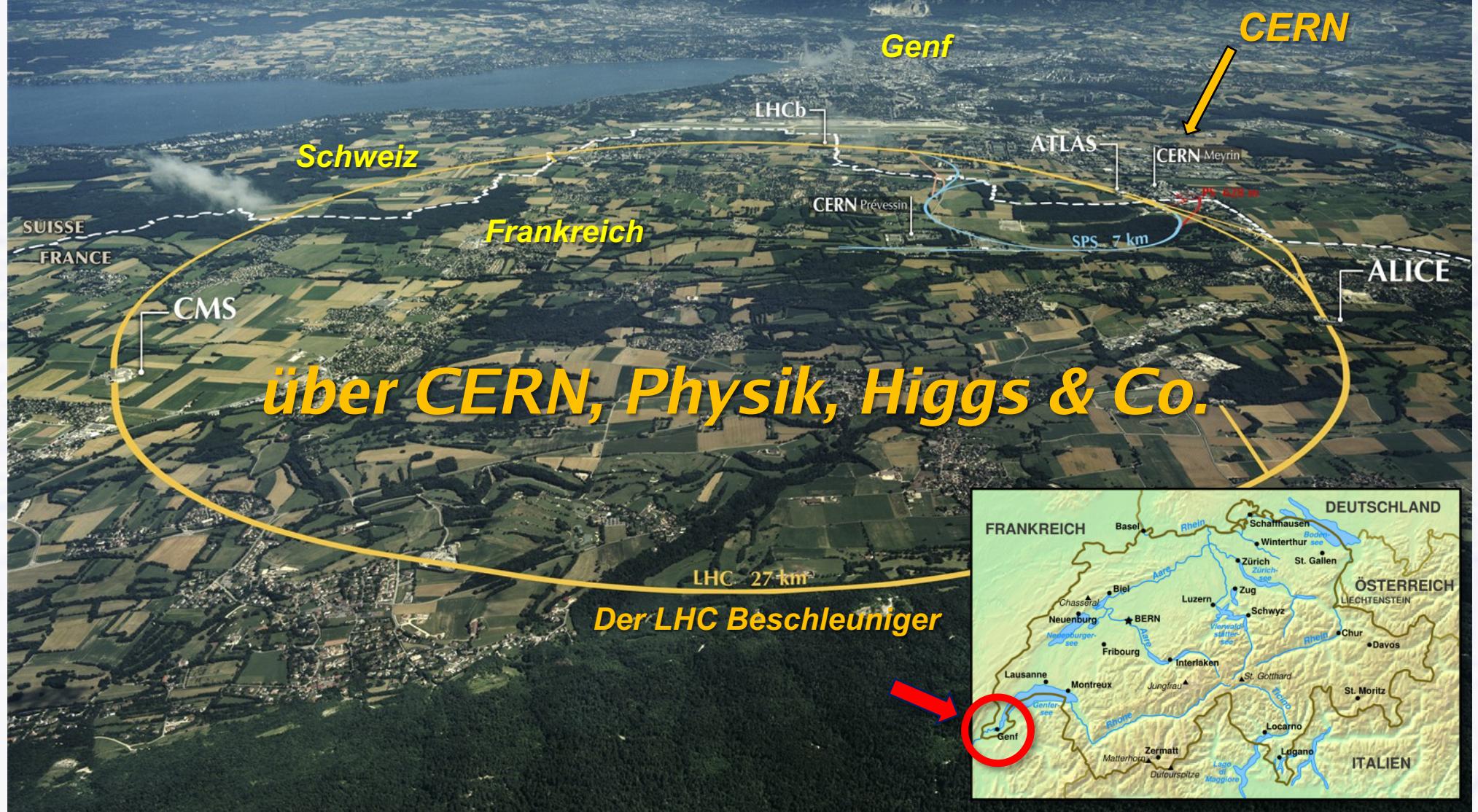


CERN

Das europäische Forschungszentrum für Teilchenphysik
(Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire)



CERN wurde 1954 gegründet: 12 europäische Länder “Wissenschaft für den Frieden”

Heute: 23 Mitgliedsländer (zuletzt: Serbien, 24. März 2019)

7 assoziierte Mitgliedsländer oder Beitrittskandidaten

(zuletzt: Litauen, 8. Januar 2018)

- ~ 2600 Staff (Angestellte)
- ~ 800 Fellows (Stipendiaten)
- ~ 13'500 “Benutzer” (Gastwissenschaftler)
- ~ 1000 weiteres Personal

Mitgliedsländer: Belgien, Bulgarien, Dänemark, **Deutschland**, Finnland, Frankreich, Griechenland, Großbritannien, Israel, Italien, Niederlande, Norwegen, Österreich, Polen, Portugal, Rumänien, Schweden, Schweiz, Serbien, Slowakien, Spanien, Tschechische Republik, Ungarn

Assoziierte Mitglieder in der Vorstufe zur Mitgliedschaft:
Slowenien, Zypern

Assoziierte Mitglieder: Indien, Litauen, Pakistan, Türkei, Ukraine

Beobachter: Japan, Rußland, Vereinigte Staaten von Amerika;
Europäische Kommission, Joint Institute for Nuclear Research, UNESCO

Länder mit der Absicht auf (assoziierte) Mitgliedschaft:
Brasilien, Estland, Irland, Kroatien, Lettland



Der Beginn von CERN

● 1946

- erste Ideen zur Gründung einer internationalen (europäischen) Wissenschaftsorganisation unmittelbar nach dem 2. Weltkrieg

● Dezember 1949

- erster konkreter Vorschlag bei der UNESCO Conference in Lausanne

● Dezember 1951 und Februar 1952

- Unterzeichnung eines Regierungsabkommen bei der UNESCO zur Gründung eines vorläufigen CERN Rates

● 4. Oktober 1952

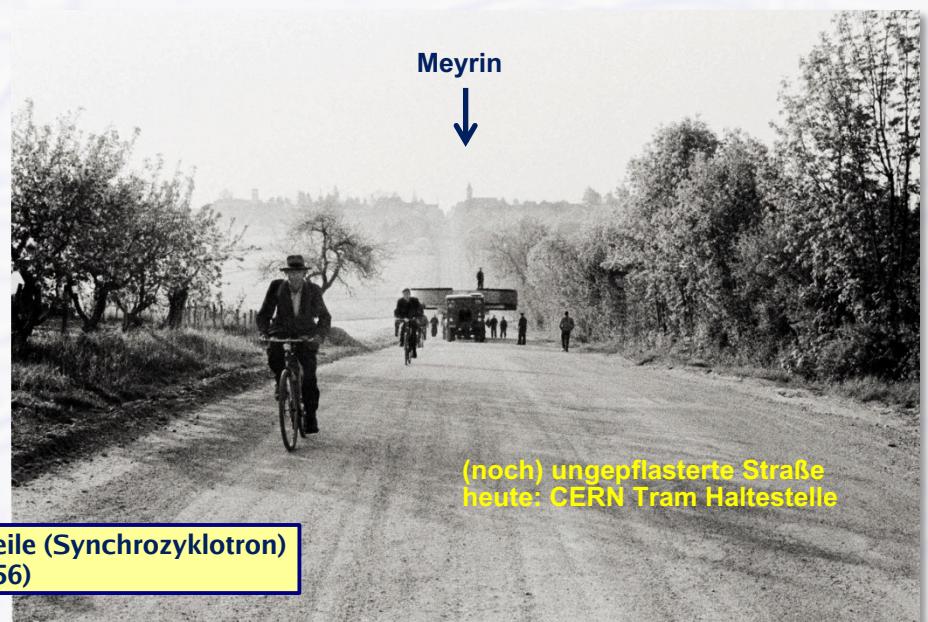
- vorläufiger CERN Rat entscheidet sich für Meyrin bei Genf als Standort (andere Vorschläge: Arnheim, Kopenhagen, Paris)

- Gelände verfügbar, bereits existierende internationale Gemeinschaft, Neutralität

● 29. September 1954

- Abkommen unterzeichnet von 9/12 Ländern, **offizieller CERN-Geburtstag**

Frühe Fotos



CERN Gelände

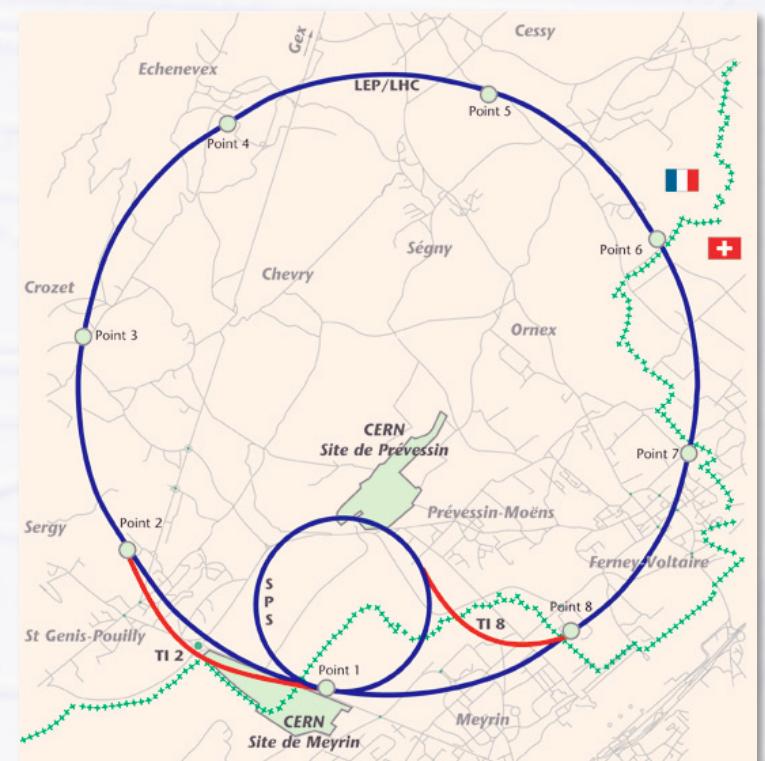
● 2 grosse Standorte

→ Meyrin (Schweiz, mit Erweiterung nach Frankreich Ende 1960er Jahre)

→ Prevessin (Frankreich, seit 1970er Jahre, zunächst eigenständig)

● 8 kleinere Standorte entlang des LHC Tunnels (in CH, F)

● weitere kleinere Standorte (SPS, LHC Magnethalle usw.)



CERN Budget 2018: 1147 MCHF

(Member States: 1123 MCHF, Associated Members: 24 MCHF)

→ umgerechnet ~1012 M€

• TU Berlin zum Vergleich:
535.5 M€ (2017, mit Drittmitteln)
35'000 Studenten

→ anteilig nach Bruttoinlandsprodukt
der Mitgliedsländer

Member States of CERN

Member States (date of accession)

Austria (1959)	Switzerland (1953)
Belgium (1953)	United Kingdom (1953)
Bulgaria (1999)	
Czech Republic (1993)	
Denmark (1953)	
Finland (1991)	
France (1953)	
Germany (1953)	
Greece (1953)	
Hungary (1992)	
Israel (2014)	
Italy (1953)	
Netherlands (1953)	
Norway (1953)	
Poland (1991)	
Portugal (1986)	
Romania (2016)	
Slovakia (1993)	
Spain (1961-1968, 1983-)	
Sweden (1953)	
	Cyprus (2016)
	India (2017)
	Lithuania (2018)
	Pakistan (2015)
	Serbia (2012)
	Slovenia (2017)
	Turkey (2015)
	Ukraine (2016)



Member State	Contribution [%]
Austria	2.15
Belgium	2.71
Bulgaria	0.29
Czech Republic	0.93
Denmark	1.80
Finland	1.33
France	14.12
Germany	20.55
Greece	1.12
Hungary	0.61
Israel	1.61
Italy	10.43
Netherlands	4.61
Norway	2.71
Poland	2.82
Portugal	1.11
Romania	1.02
Slovak Republic	0.49
Spain	7.04
Sweden	2.70
Switzerland	4.02
United Kingdom	15.84

Deutschland und CERN

- (West-)Deutschland ist einer der ersten 12 CERN Gründerstaaten (1954)

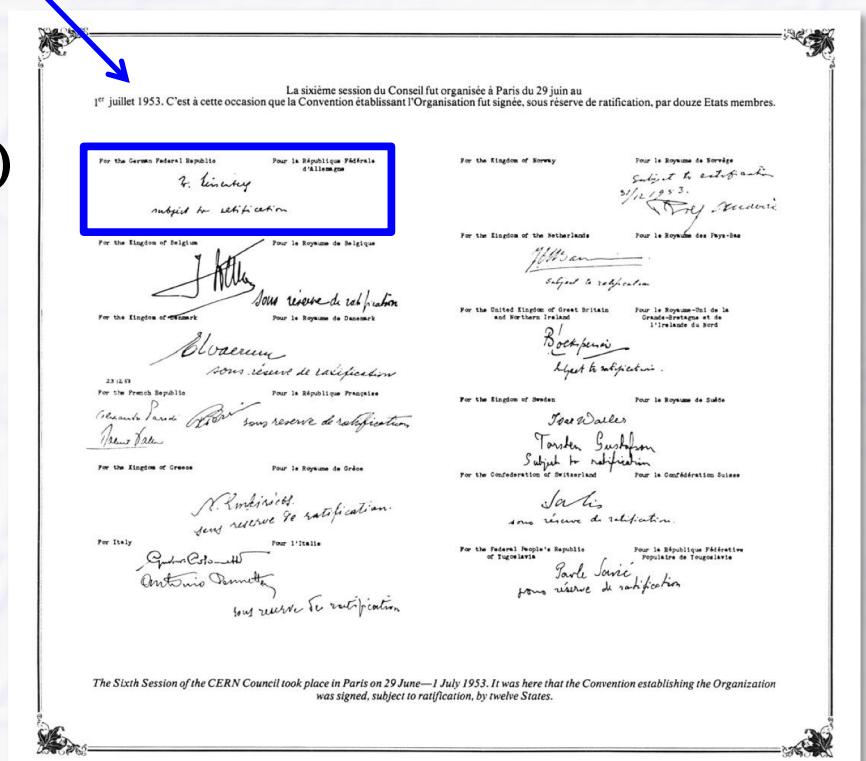
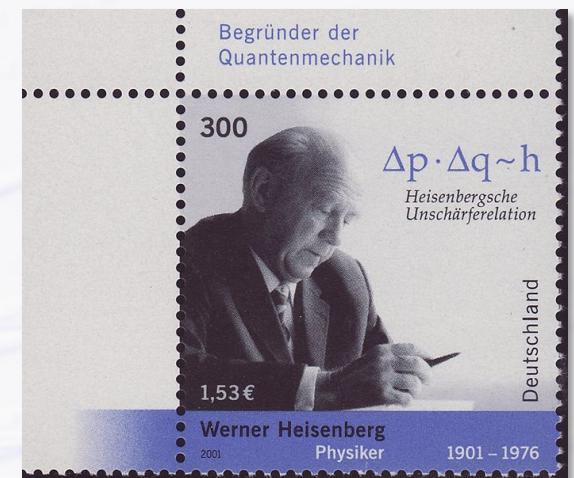
→ Werner Heisenberg (Nobelpreisträger 1932) (unterzeichnete CERN Vertragsurkunde)

- Teilchenphysik hatte immer eine hohe Bedeutung in Deutschland

→ Nationales Labor: DESY (HH, Zeuthen)
→ Internationales Labor mit starker deutscher Beteiligung: CERN

- Zwei deutsche CERN General-Direktoren (beide vormals DESY)

→ Herwig Schopper (1981 – 1988)
→ Rolf-Dieter Heuer (2009 – 2015)



Teilchenphysik in Deutschland

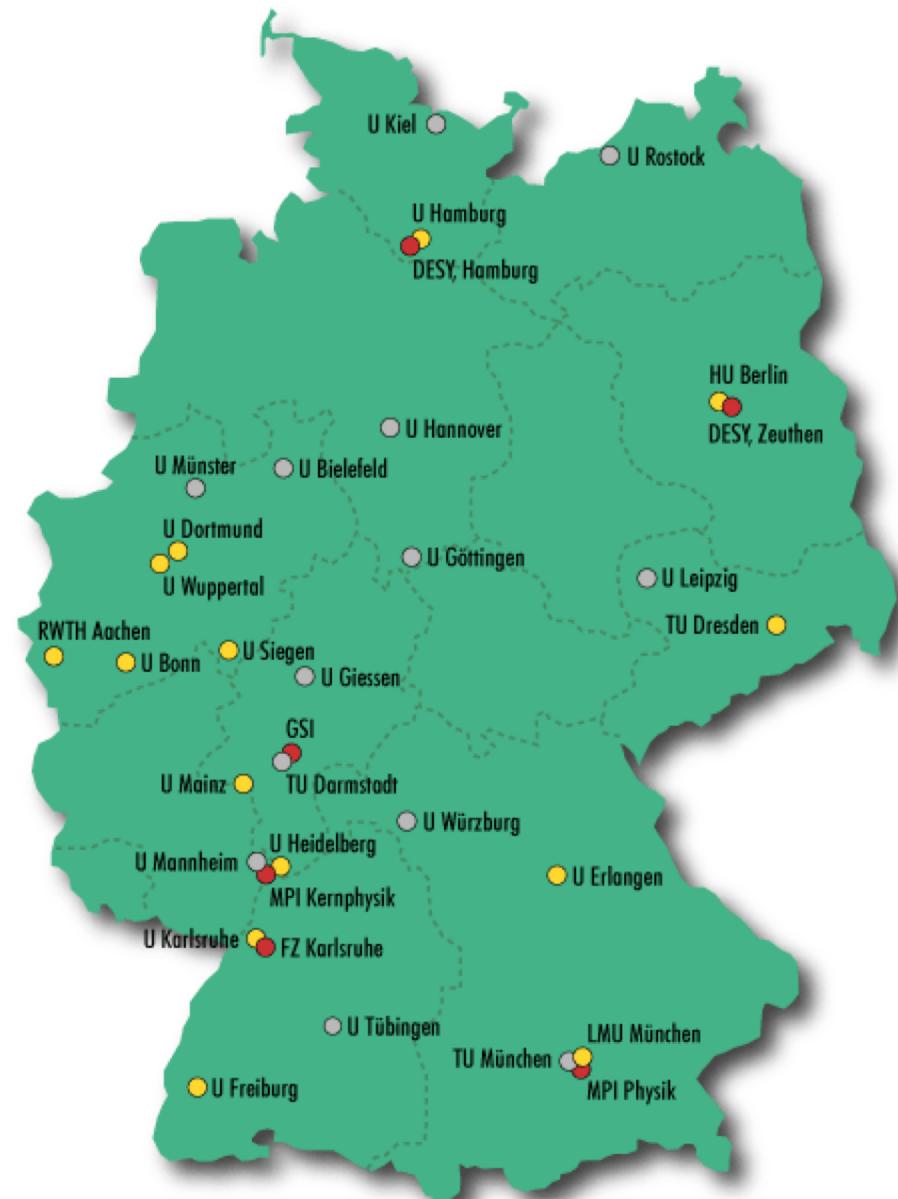
Universitäten und Forschungszentren in Deutschland

- Universitäten mit sowohl experimenteller und theoretischer Teilchenphysik: 14
- Universitäten mit entweder experimenteller oder theoretischer Teilchenphysik: 12
- Forschungszentren (Standorte) ausserhalb Universitäten: 6

gelb: Universität (exp. und theo.)

grau: Universität (exp. oder theo. oder IT)

rot: Forschungszentrum (ausserhalb Universität)



Deutsche Prominenz am CERN



Bundeskanzlerin Angela Merkel,
April 2008



Bundespräsident Joachim Gauck,
April 2014

- + Ministerinnen für Bildung und Forschung (Johanna Wanka, Annette Schavan, Edelgard Bulmahn), weitere Landesminister, Staatssekretäre, Uni-Rektoren...

CERN Organisation: Council

CERN Council

Präsidentin: Ursula Bassler (FR, DE)

22 Mitgliedsstaaten

2 Delegierte

8 Assoziierte Mitgliedsstaaten

2 Delegierte

Ex-Officio Mitglieder

Verschiedene Beobachter auf Einladung

Finance Committee

Vorsitzender: Ossi Malmberg (FL)

Scientific Policy Committee

Vorsitzender: R. Keith Ellis (GB)

Deutsche Delegierte:

Volkmar Dietz (BMBF)

Siggi Bethke (MPI für Physik, München)



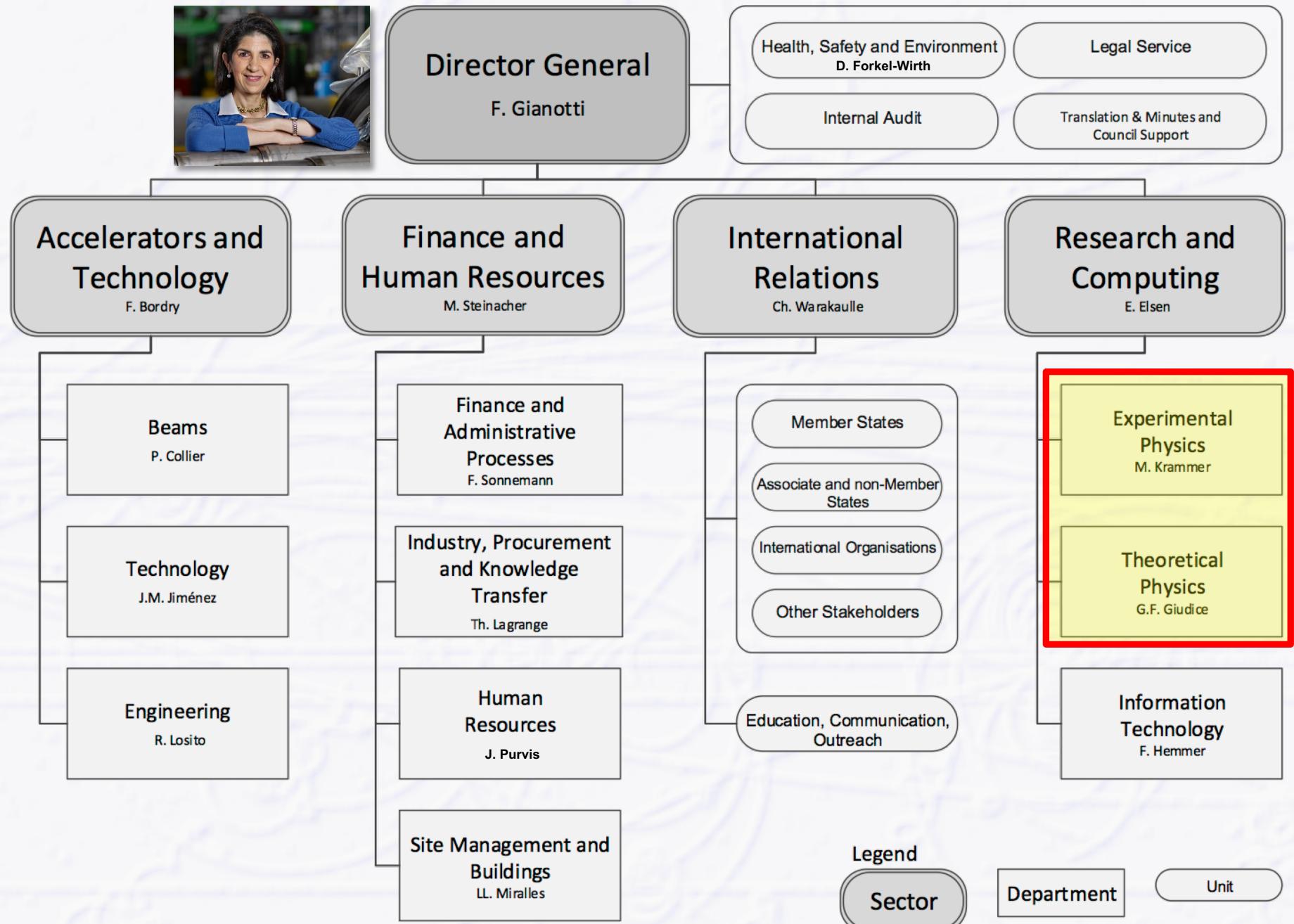
Tripartite Employment Forum

Vorsitzender: Barbro Åsman (SE)

Pension Fund Governing Board

Vorsitzender: Thomas Roth (DE, BMBF)

CERN Management



Aufgabenteilung im CERN

- **Hauptanteil der CERN Angestellten: Ingenieure und Techniker**
 - nur 13% Physiker
- **CERN ist beides:**
Technologielabor + wissenschaftliches Zentrum
 - CERN Angestellte: **Technologie** (hauptsächlich)
 - Design, Bau und Betrieb grosser Beschleunigeranlagen (Infrastruktur “provider”)
 - CERN “Benutzer” aus Universitäten und anderen Forschungszentren:
Wissenschaft (hauptsächlich)
 - Design, Bau, Betrieb der Teilchendetektoren und Physikdatenanalyse
- **Teilchenkollisionspunkt ist Schnittstelle zwischen CERN Angestellten und Gastwissenschaftlern**
 - Erzeugung der Kollisionen: CERN Angestellte
 - Vermessung und Analyse der Kollisionen: Gastwissenschaftler

Distribution of All CERN Users by Nationality on 24 January 2018

13'342 CERN “Benutzer” (Gastwissenschaftler) aus Instituten
in 78 Ländern (~9.9% Deutsche) und mit 111 Nationalitäten

MEMBER STATES

7889

Austria	117
Belgium	120
Bulgaria	96
Czech Republic	244
Denmark	67
Finland	111
France	868
Germany	1342
Greece	237
Hungary	76
Israel	65
Italy	2045
Netherlands	168
Norway	67
Poland	350
Portugal	127
Romania	134
Slovakia	124
Spain	447
Sweden	85
Switzerland	228
United Kingdom	771



OBSERVERS 2718

Japan	314
Russia	1187
USA	1217

ASSOCIATE MEMBERS

745

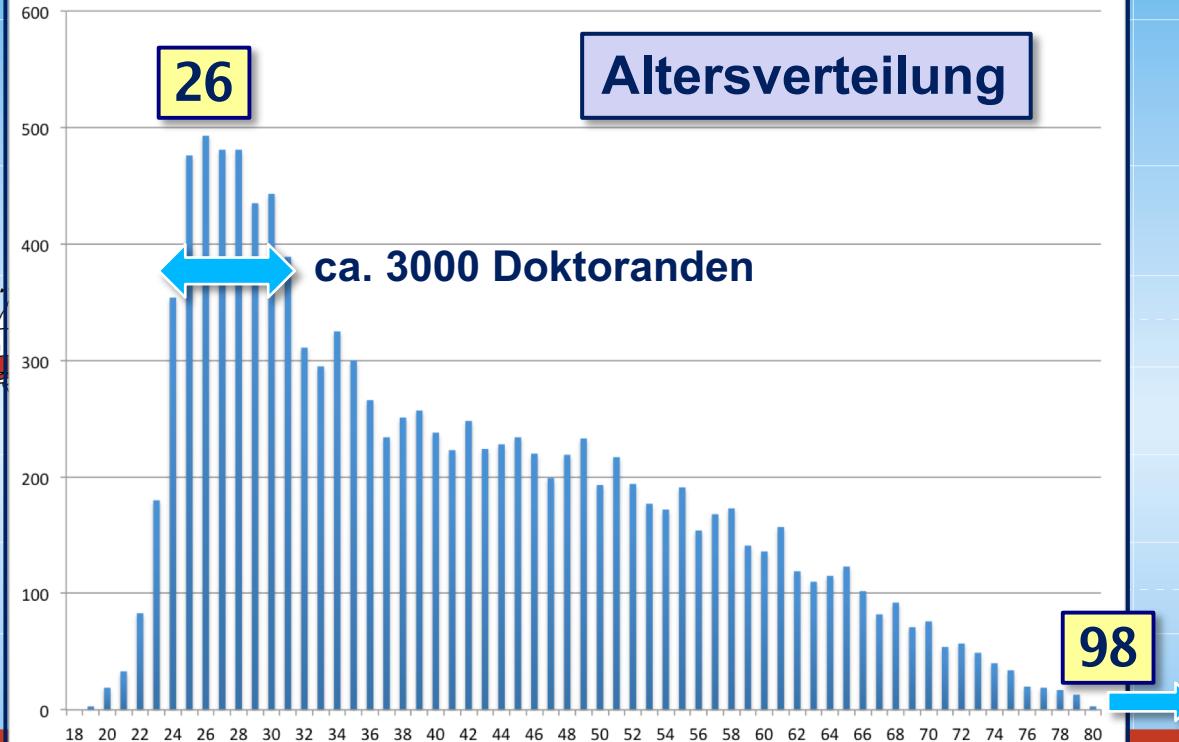
India	357
Lithuania	35
Pakistan	65
Turkey	173
Ukraine	115

118

ASSOCIATE MEMBERS IN THE PRE-STAGE TO MEMBERSHIP	118
Cyprus	26
Serbia	57
Slovenia	35

OTHERS 1872

Bolivia	4	Egypt	31	Kazakhstan	5	Mongolia	2	Philippines	3	Thailand	22
Bosnia & Herzegovina	2	El Salvador	1	Kenya	3	Montenegro	11	Saint Kitts		T.F.Y.R.O.M.	2
Afghanistan	1	Estonia	15	Korea Rep.	185	Morocco	20	and Nevis	1	Tunisia	5
Albania	3	Georgia	46	Kyrgyzstan	1	Myanmar	1	Saudi Arabia	2	Uruguay	1
Algeria	14	Ghana	1	Latvia	2	Nepal	10	Senegal	1	Uzbekistan	4
Argentina	27	Hong Kong	1	Lebanon	23	New Zealand	5	Singapore	4	Venezuela	10
Armenia	19	Iceland	3	Luxembourg	2	Nigeria	3	South Africa	56	Viet Nam	13
Australia	31	Indonesia	11	Madagascar	4	North Korea	1	Sri Lanka	6	Zambia	1
Azerbaijan	10	Iran	51	Malaysia	15	Oman	3	Sudan	1	Zimbabwe	2
Bangladesh	11	Iraq	1	Malta	9	Palestine (O.T.)	7	Swaziland	1		
Belarus	48	Ireland	16	Mauritius	1	Paraguay	2	Syria	1		
Benin	1	Jordan	1	Mexico	82	Peru	7	Taiwan	51		



Altersverteilung

ca. 3000 Doktoranden

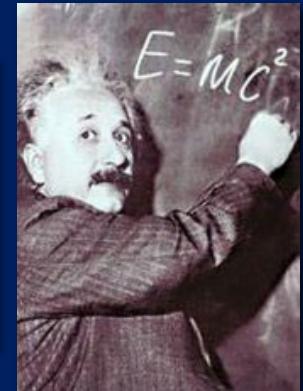
98



Die Aufgaben von CERN

□ Vorantreiben der Grenzen des Wissens

den Urknall erforschen ...wie und was war die Materie in den ersten Momenten nach dem Urknall?



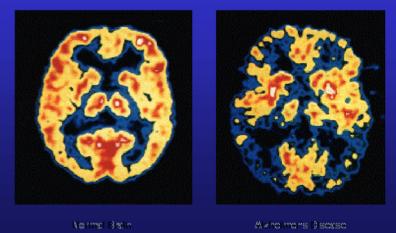
□ Entwicklung neuer Technologien für Beschleuniger und Detektoren

Informationstechnologie - das Web

Medizin - Diagnose und Therapie



Brain Metabolism in Alzheimer's Disease: PET Scan



□ Ausbildung von Wissenschaftlern und Ingenieuren von morgen



□ Zusammenführen von Menschen aus verschiedenen Ländern und Kulturen



Ausbildungsprogramme am CERN

● Summer Students (2 – 3 Monate, ~350 Studenten)

- Studierende im 3. – 4. Jahr,
70% Physik – 30% Ingenieurswissenschaften und Informatik
 - 5 Wochen Vormittags-Vorlesungen + Arbeit in einer CERN Gruppe (kleines Projekt)

● Technical Students (6 – 12 Monate, ~200 Studenten)

- Masterstudenten in technischen Bereichen
- **Sonderprogramm Baden-Württemberg (einige FHs + KIT) und Rheinland-Pfalz**

● Doctoral Students (3 Jahre, ~220 Studenten)

- Doktoranden mit technisch orientierten Themenbereichen
- **Deutsches Sonderprogramm (Wolfgang-Gentner-Programm)**

● Fellows (2 – 3 Jahre, ~850 Fellows)

- Junior-Fellowships: technischer Master, keine Promotion erforderlich
- Senior-Fellowships: Promotion erforderlich oder >4 Jahre nach Master

Lehrer- und Schülerausbildung

● **High School Teachers Programme (HST)**

- 3 Wochen im Sommer, ~40-50 Teilnehmer/Jahr, auf Englisch

● **National Teacher Programmes (in Landessprache, 1 Woche)**

- 2017: 31 Kurse mit 952 Physik-Lehrern

● **S'Cool LAB**

- Experimente für Schüler

- Bau einer Nebelkammer
- Röntgen-Röhre + Experimente
- Supraleitung
- Fadenstrahlrohr
- ATLAS Magnetmodell

- 2017:

- 7240 Schüler aus 58 Ländern



CERN's wissenschaftliche Aufgaben

● Beantwortung fundamentaler Fragen

→ Warum haben Teilchen Masse (sind schwer)?

- Newton konnte dies nicht erklären, aber Higgs...



Higgs
Boson

→ Aus was besteht 96% des Universums?

- Nur 4% besteht aus Elementarteilchen, die wir kennen. Und der Rest???

→ Warum gibt es im Universum keine Antimaterie?

- Materie und Antimaterie sollte gleichermaßen nach dem Urknall entstanden sein. Es scheint nur Materie im Universum zu geben. Wo ist die Antimaterie?

→ Wie war der Zustand der Materie kurz nach dem „Urknall“?

- Wie hat sich unser Universum daraus entwickelt?

● Letztlichendlich: Warum gibt es uns überhaupt?

CERN's wissenschaftliche Aufgaben

• **Grundlagenforschung mit Elementarteilchen bei höchsten Energien (Hochenergiephysik)**

- Bau und Betrieb des weltweit grössten Teilchenbeschleunigers **LHC** (**Large Hadron Collider**) seit 2009
- 27 km Tunnel, **4 (riesige) Teilchendetektoren** in unterirdischen Kavernen
- Wissenschaftliche Ziele
 - Suche nach dem **Higgs Teilchen (GEFUNDEN!)** + präzise Vermessung der Eigenschaften
 - Suche nach **neuen Teilchen** (z.B. dunkle Materie Teilchen)

• **Weitere Forschungsgebiete (Auswahl):**

- Antimaterie (6 Experimente am Antiprotonen “Entschleuniger” AD)
 - Unterschiede zu Materie, Spektroskopie, Anziehung im Schwerefeld
- Proton-Struktur (COMPASS Experiment)
- seltene Kaon Zerfälle (NA62) $Br(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu\bar{\nu}) \approx 10^{-10}$
 - sensitiv auf Abweichungen vom Standardmodell

Wissenschaftliche Vielfalt am CERN

● ISOLDE Radioaktive Ionenstrahlen

- Grundlagenforschung an radioaktiven Isotopen
- neu: MEDICIS (Produktion radioaktiver Isotope für die Medizinforschung)

● nTOF (neutron Time-of-Flight Facility)

- nukleare Astrophysik + Kernphysik,
Dosimetrie + Strahlungsschäden

● CLOUD Experiment

- Einfluß von kosmischer Strahlung auf die Wolkenbildung



● AMS (Alpha Magnetic Spectrometer)

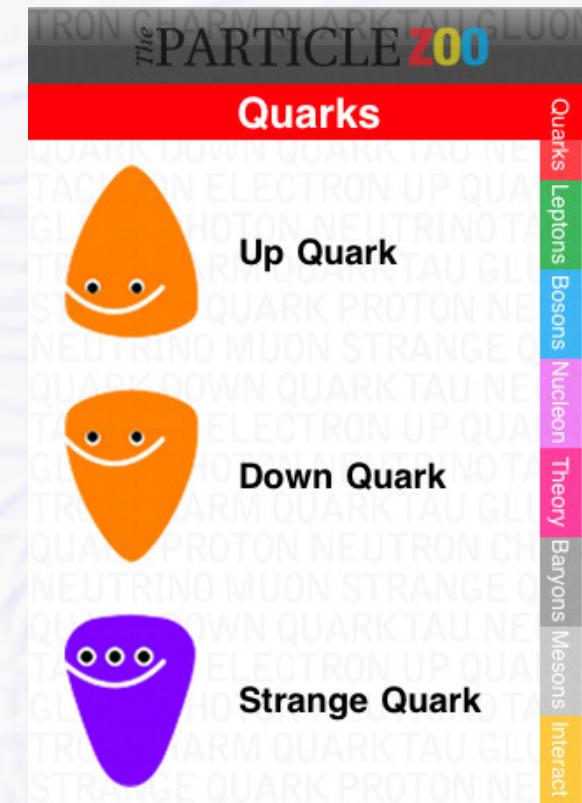
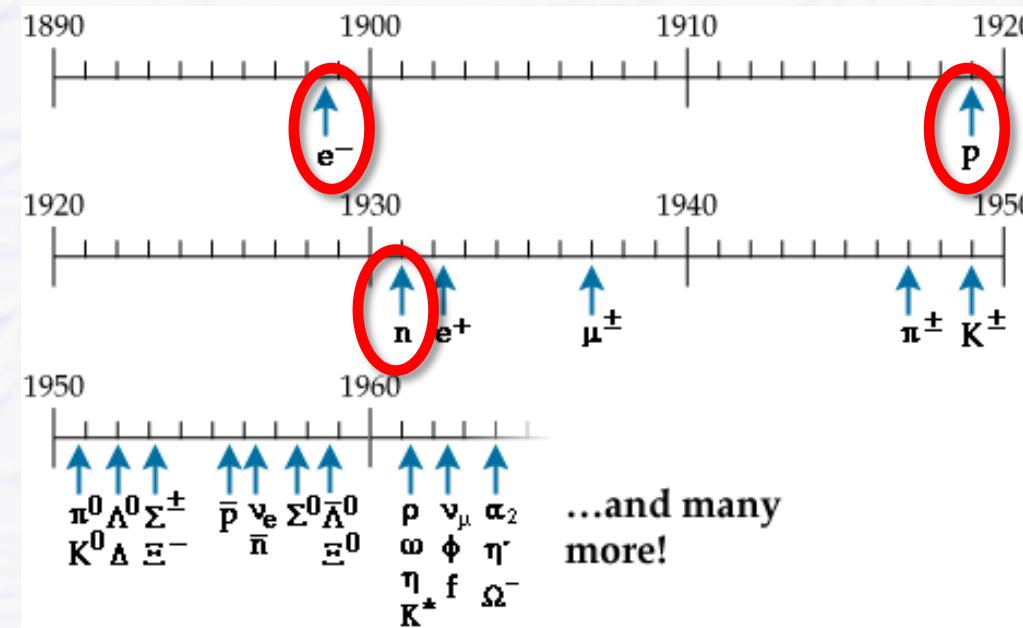
- Suche nach Antimaterie in kosmischer Strahlung
- Auf der International Space Station
vorletztem Space Shuttle Flug
im Mai 2011
- AMS Kontrollzentrum am CERN



Teilchenphysik in den 1950...60ern

- Viele neue Teilchen wurden entdeckt (“Teilchenzoo”)
 - möglich gemacht durch immer stärkere Beschleuniger

→ 1959: CERN Proton Synchrotron (noch heute in Betrieb)



Fundamentale Fragen

- Was sind grundlegenden Bausteine der Materie? → **Quarktheorie** (1964)
- Welche Kräfte wirken zwischen den Materienteilchen? → **Standardmodell**
- Wie erhalten Teilchen ihre (verschiedene) Masse? → **Higgs** (1964/2012)

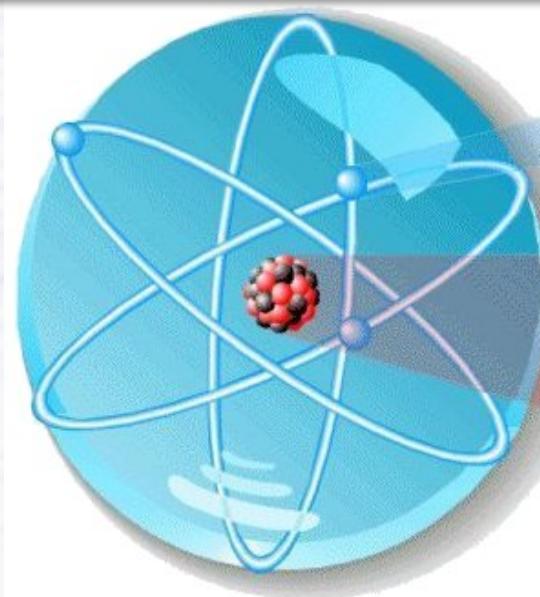
Aufbau der Materie

- Heutiges Wissen: Materie hat eine hierarchische Struktur
 - nur **Elektronen** und **Quarks** sind elementar ("punktformig")

Atom:

Philosophisch: Demokrit, 4. Jh. vor Christus

Theoretisch/Experimentell: Einstein/Perrin, Erklärung/Messung der Brown'sche Bewegung, 1905



nucleus
 $\sim 10^{-12}$ cm

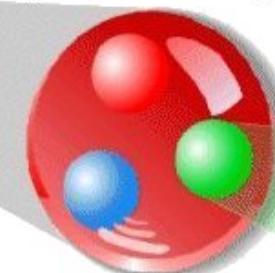
Atomkern:
Rutherford, Streuung von α-Teilchen (Heliumkernen) an Goldatomen, 1910

Elektron:

J.J. Thomson, Kathodenstrahlen, 1897



proton
(neutron)



$\sim 10^{-13}$ cm

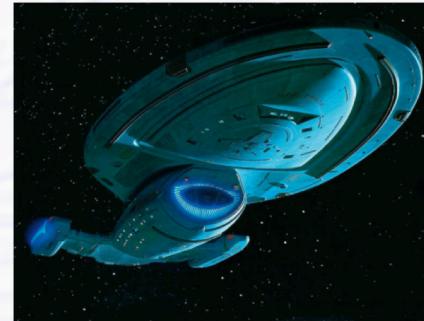
Proton: Rutherford, 1919
Neutron: Chadwick, 1932



Quark-Modell:
Gell-Mann, Zweig, 1964

Antimaterie

- Sehr populär seit Star Trek (Raumschiff Enterprise) und Illuminati
 - **Antiteilchen verhalten sich wie normale Teilchen mit gleicher Masse aber mit umgekehrter Ladung**

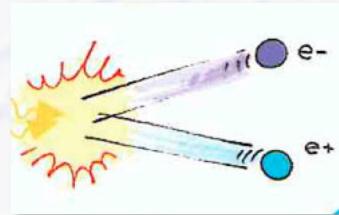


Name	Elektrische Ladung [e]	Masse [GeV/c ²]	Elektrische Ladung [e]	(Anti-)Name
Elektron	- 1	0.0005	+ 1	Positron
Proton	+ 1	0.938	- 1	Antiproton
Neutron	0	0.941	0	Antineutron

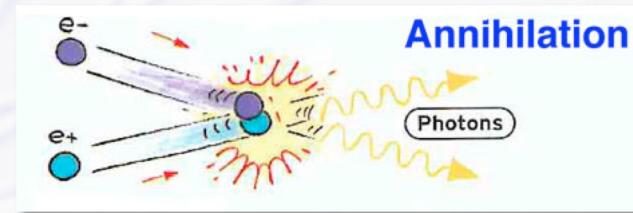
Neutron: Ladungen der Quarks im Neutron kehren sich um

Antimaterie

- Erzeugung von Antiteilchen zusammen mit normalen Materienteilchen aus Umwandlung von Energie in Masse



$$E \rightarrow mc^2$$



$$mc^2 \rightarrow E$$

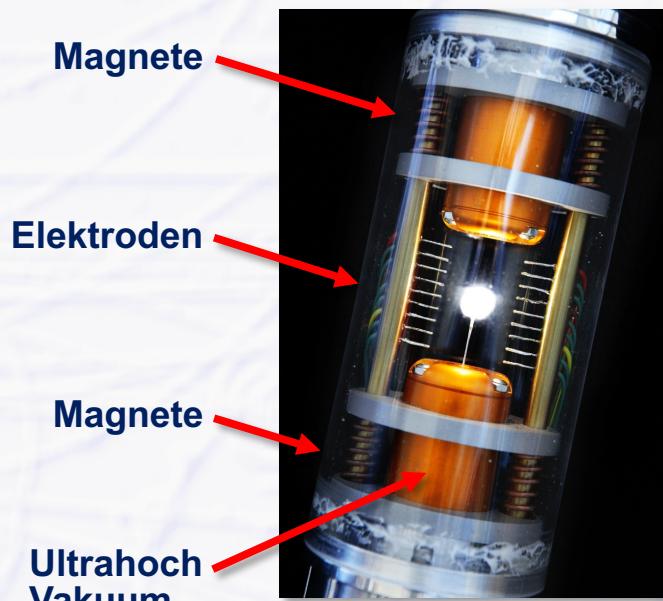
- Produktion am CERN

- intensiver Proton-Strahl (aus Beschleuniger) trifft auf Target (Materieblock)
- Erzeugung von Teilchen aller Art: Pionen, Neutronen, Protonen, Antiprotonen,...
 - hohe Energien ~einige hundert MeV bis mehrere GeV
- Ausfiltern von Antiprotonen (Filterung durch Magnetfelder)
- Verlangsamung der Antiprotonen in mehreren Schritten
 - Energien im atomaren Bereich ~10 eV

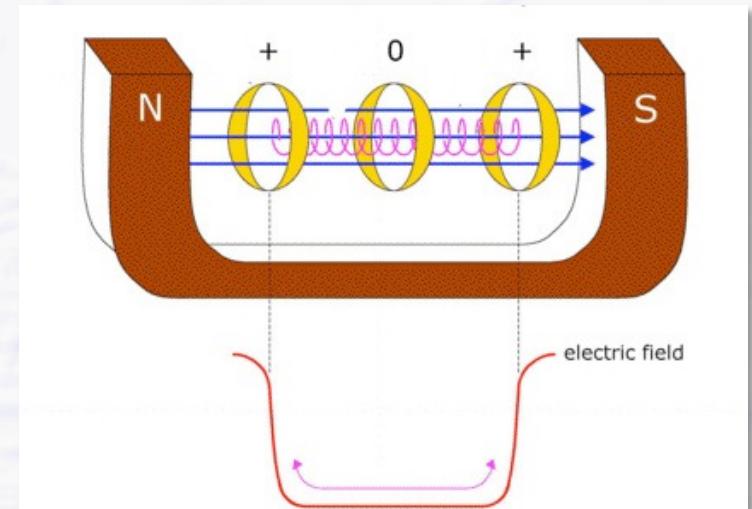
Speicherung von Antimaterie

Speicherung in Antimaterie-”Falle”

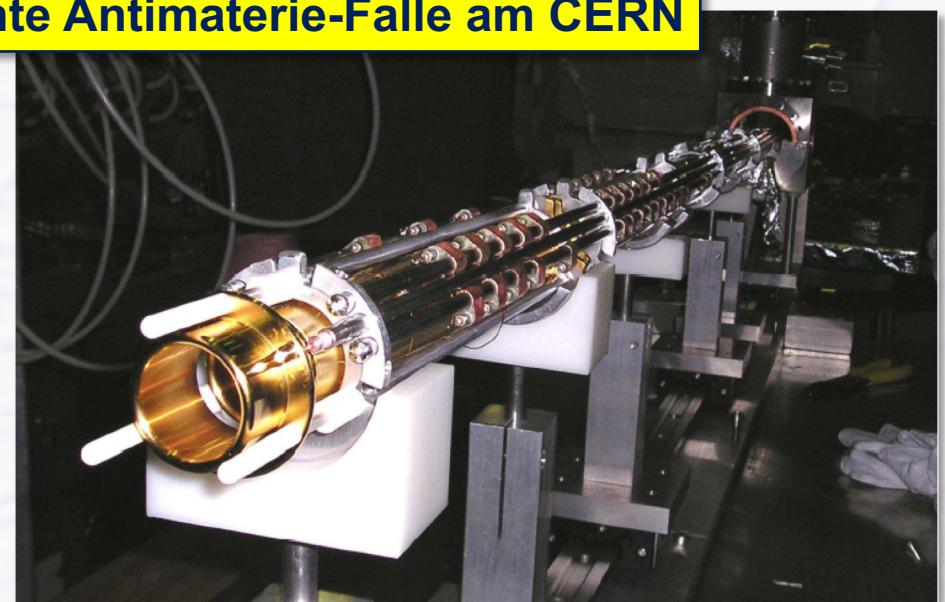
- Kombination von magn.+ el. Feldern



Filmversion aus “Illuminati”



Echte Antimaterie-Falle am CERN

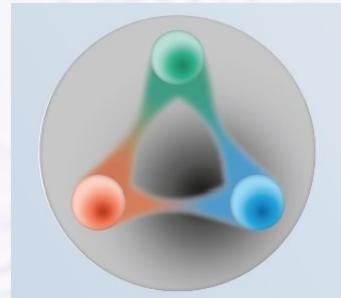


- Speicherdauer: ~viele Monate
- ~10 Millionen Antiprotonen
 - geplant: ~1 Milliarde Antiprotonen

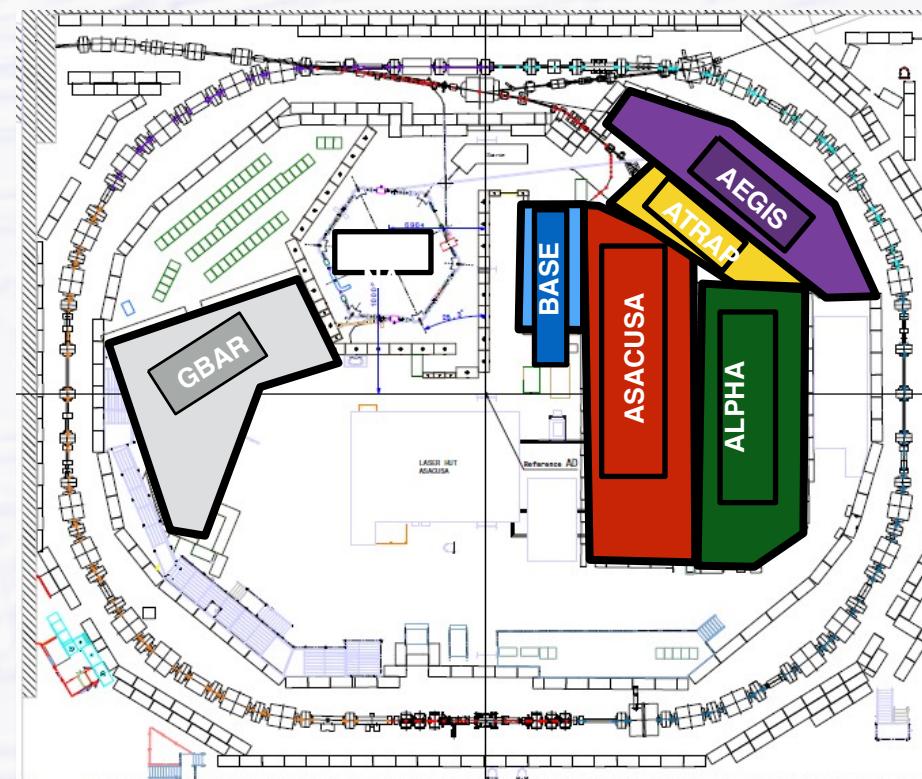
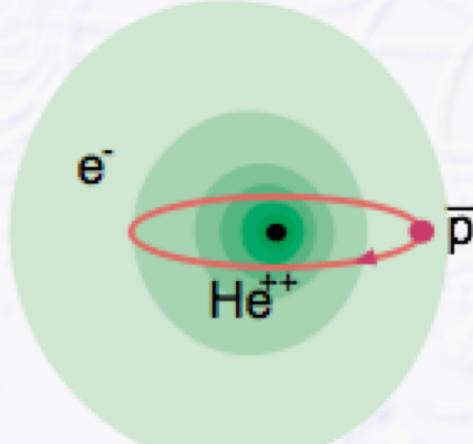
Die Antimaterie Fabrik



Antiprotonen

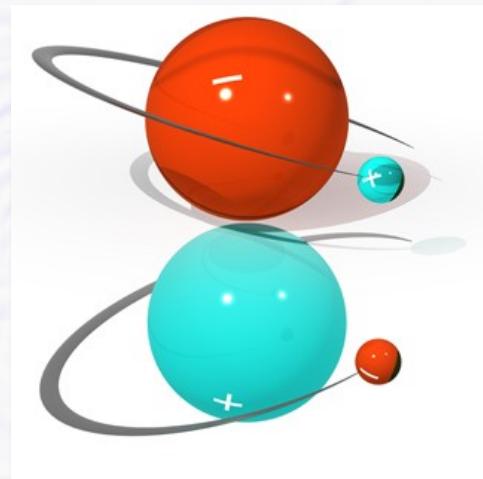


Antiprotonisches Helium



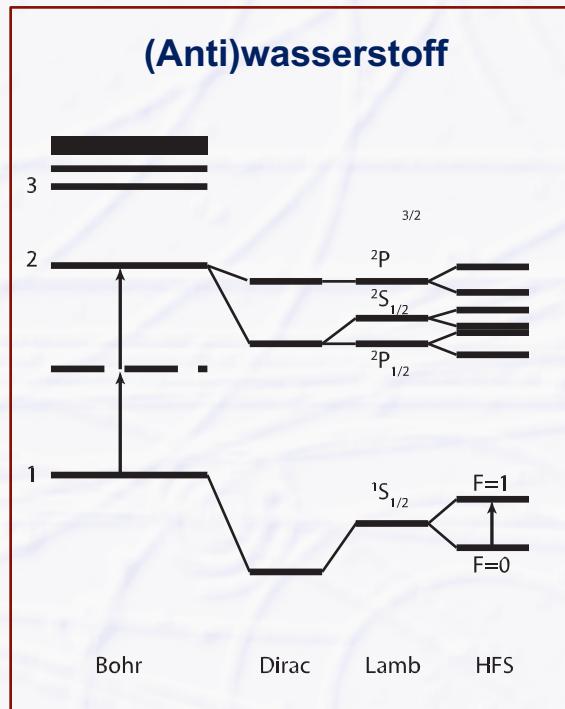
Antiproton Decelerator ("Entschleuniger")

Antiwasserstoff



Experimente mit Antimaterie

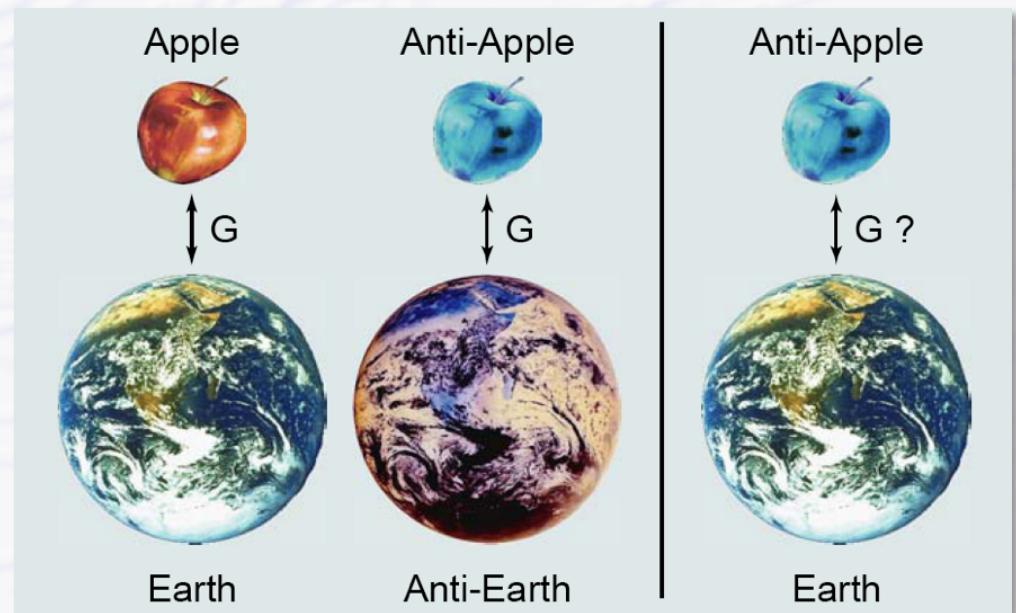
Spektroskopie



Gravitation

gemessen: erwartet:

???

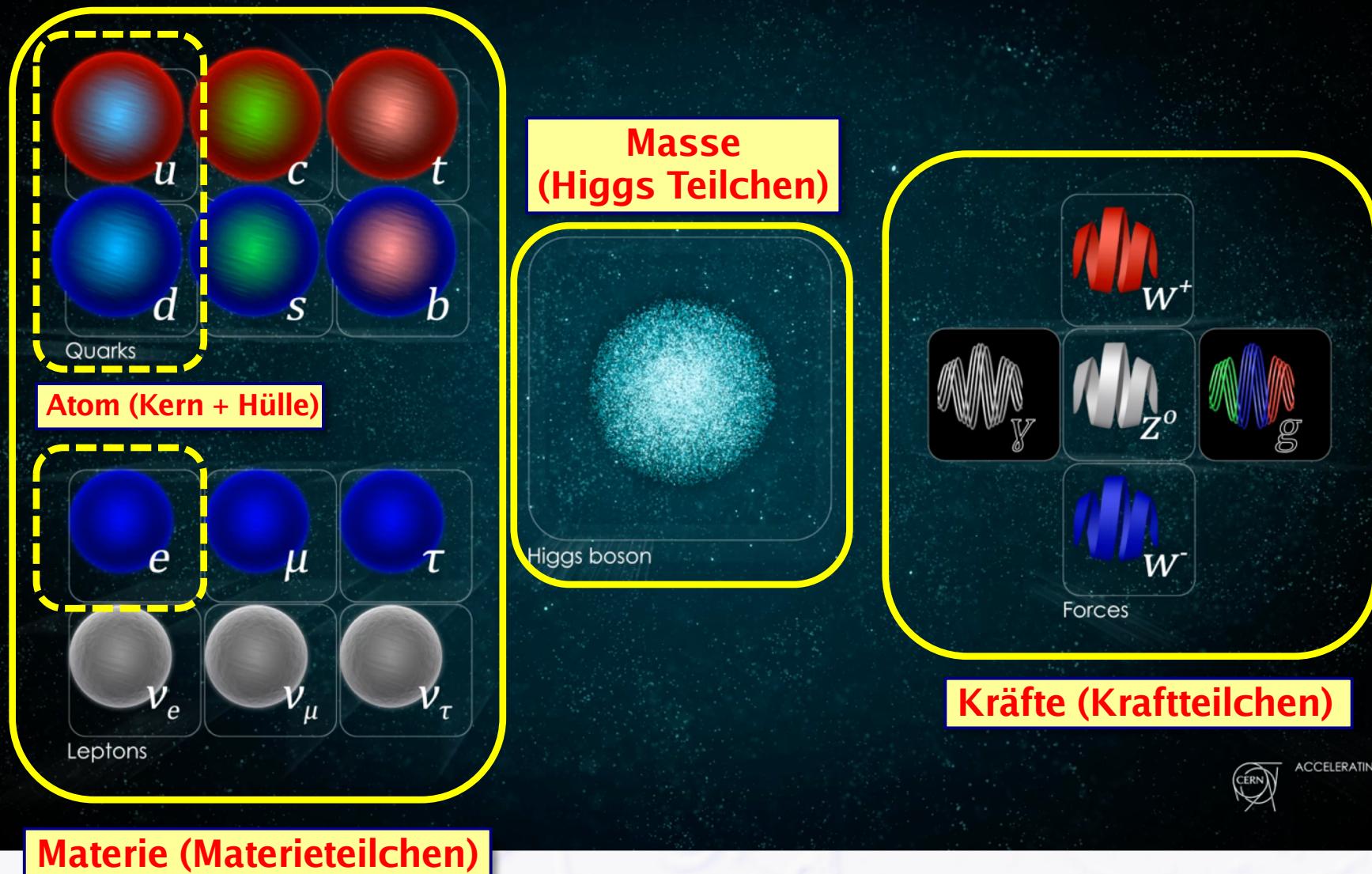


- Vergleich der Spektren von Wasserstoff und Antiwasserstoff
- Übereinstimmung auf $< 10^{-14}$

- Keine Vorhersage für die Anziehung / Abstoßung von Materie und Antimaterie
- **Antigravitation???**
- bisher noch nicht gemessen

Das Standardmodell auf einen Blick

- Entwickelt seit den 1960er Jahren



Higgs-Mechanismus

Das Standardmodell ist (war) fast komplett

- alle Materie- und Kraftteilchen wurden gefunden
 - zuletzt: top-quark (1995), tau-neutrino (2000)
- aber: alle Teilchen haben im Standardmodell keine Masse

Idee von Peter Higgs (1964) und anderen

- Das Vakuum ist nie leer, sondern immer erfüllt mit einem Higgs-Feld
 - Higgs-Feld ähnlich elektrischem Feld oder Magnetfeld
- Das Higgs-Feld existiert überall im gesamten Universum
 - zunächst masselose Teilchen wechselwirken ständig mit dem Higgs-Feld
 - Wechselwirkung verursacht "Trägheit" = Teilchen erhält träge Masse

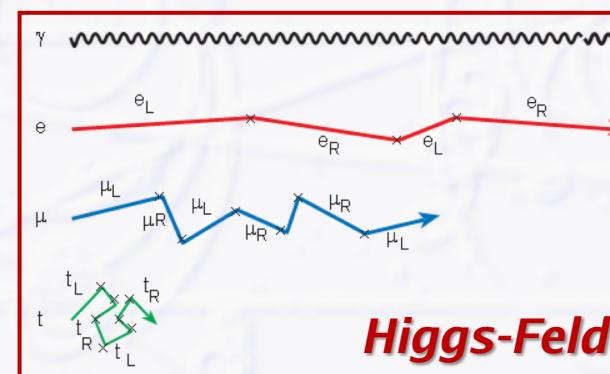
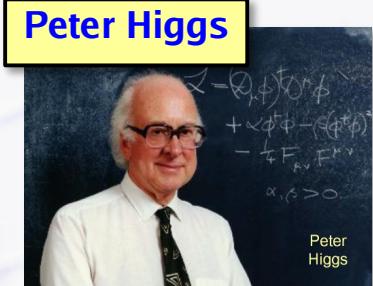
keine Masse: Photon

geringe Masse: Elektron

mittelschwere Masse: Myon

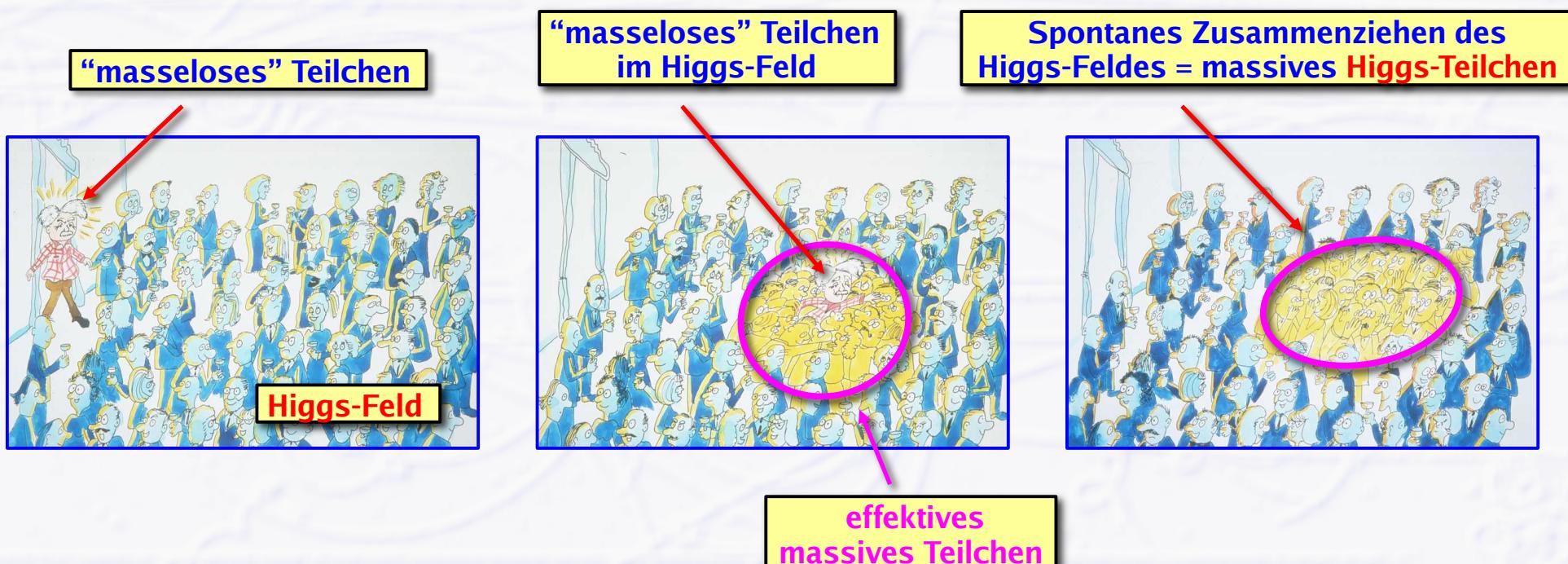
sehr schwere Masse: Top-Quark

Peter Higgs



Higgs-Feld → Higgs-Teilchen

- **Dave Miller (UC London) 1993 zum damaligen britischen Wissenschaftsminister auf dessen Frage zur Bedeutung des Higgs-Teilchens**
 - ...und warum er dafür Steuergelder ausgeben sollte
 - Vergleich mit politischer Partei (**Parteimitglieder = Higgs-Feld**) und dem plötzlichen Auftreten der **Parteivorsitzenden (masseloses Teilchen)**



Higgs-Feld → Higgs-Teilchen

- Higgs-Feld = Wasserfläche, Higgs-Teilchen = Wassertropfen

Higgs-Feld

Higgs-Teilchen

Zerfall

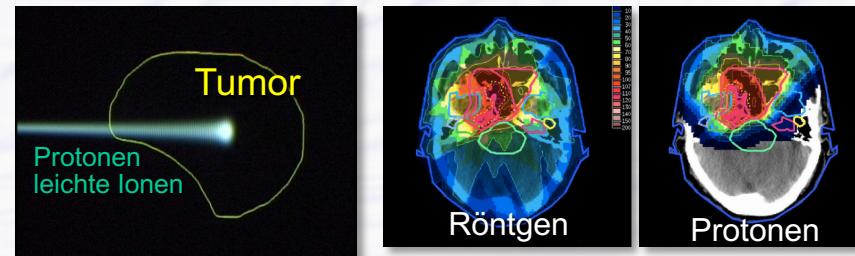
Anregung

Credits: stepvideolabs (2014)

“Spin-offs” der Teilchenphysik: medizinische Anwendungen



Hadronentherapie

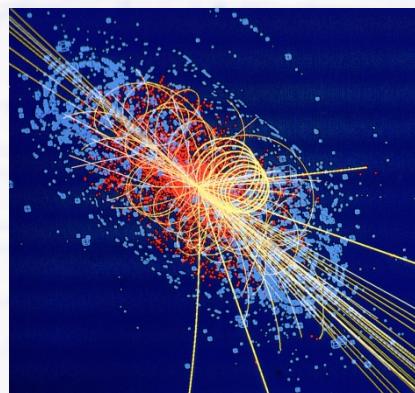


Europa und Japan
sind führend in
Ionenstrahltherapie

Beschleunigte Teilchenstrahlen

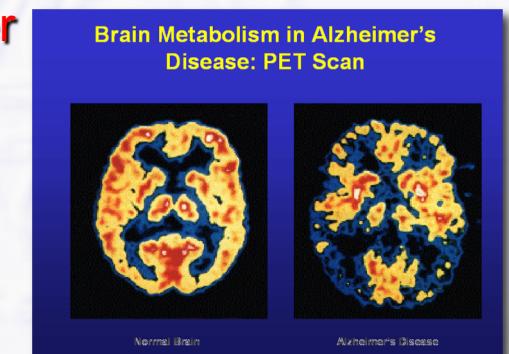
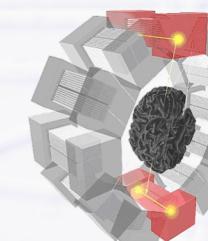
~30'000 Beschleuniger weltweit
davon ~17'000 für medizinische Zwecke

>70'000 Patienten weltweit behandelt (30 Anlagen)
davon >21'000 Patienten in Europa (9 Anlagen)



Bildgebung PET Scanner

Klinischer Test in
Portugal eines neuen
Brustdarstellungs-
Systems (ClearPEM)



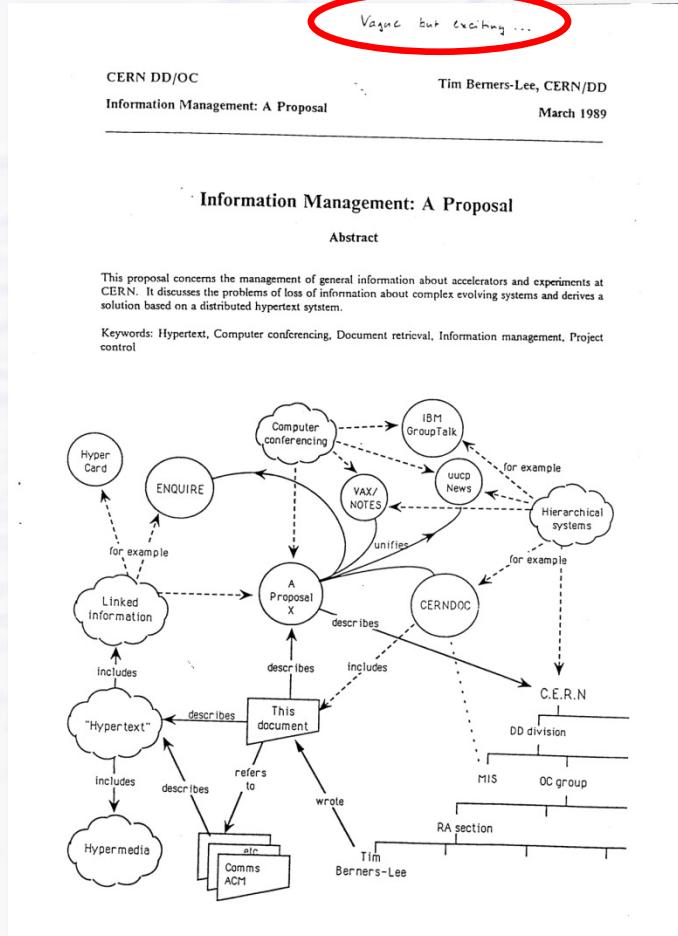
Nachweis von
Teilchen

PET = Positron Emission Tomography
(Positronen = Antimaterie)

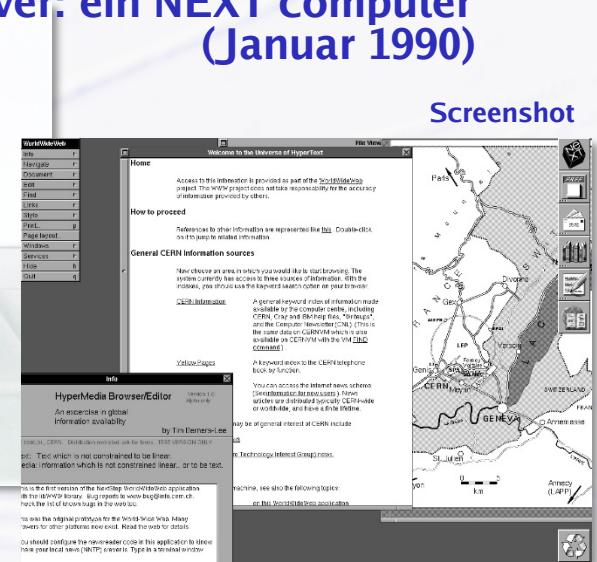
CERN: “Where the Web was born...”

Die Idee von Tim Berners-Lee (März 1989):

Kommentar des Chefs: “Vague but exciting...”



Der erste Web Server: ein NEXT computer
(Januar 1990)

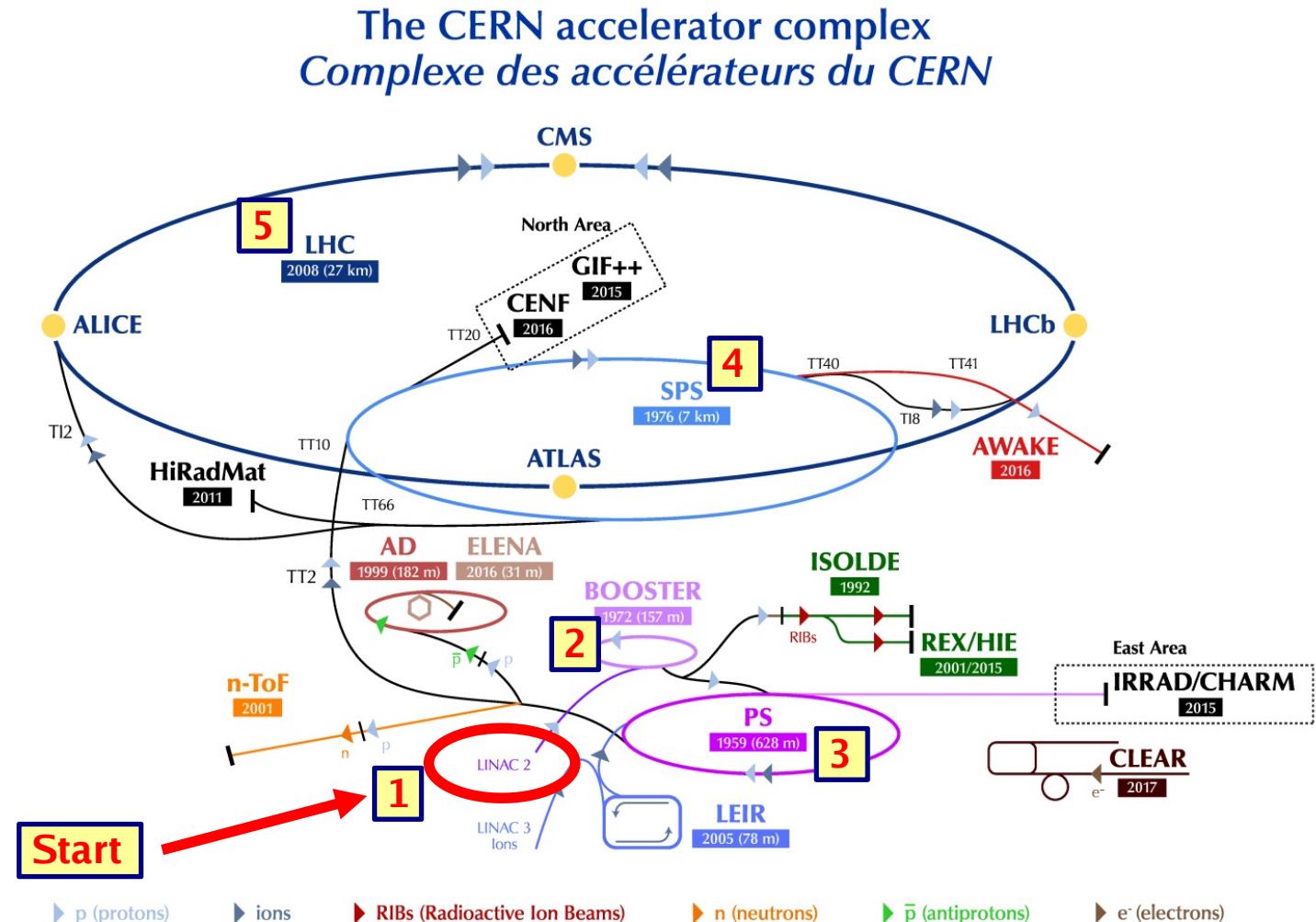
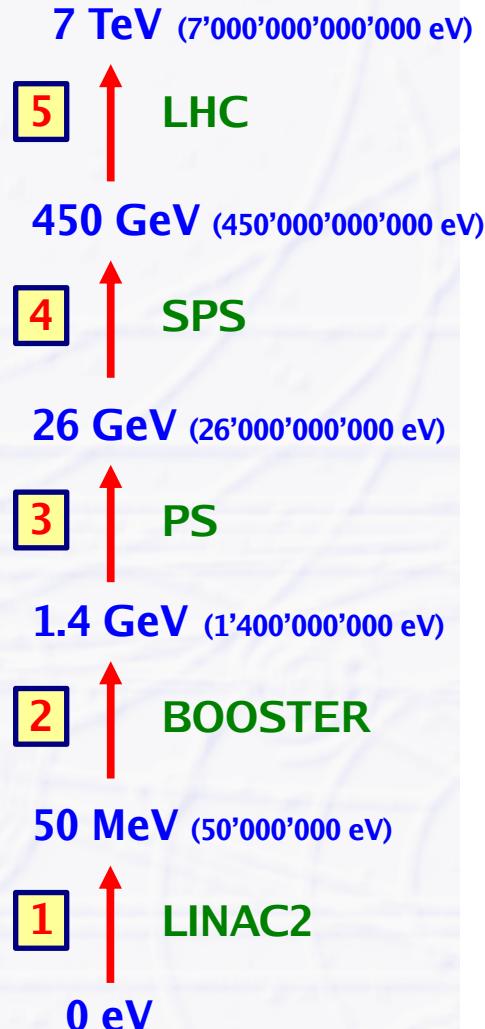


2 Jahre später im Büro (Februar 1991)



20. Jahrestag
(März 2009)

CERN Beschleuniger Komplex



zum Vergleich:
1.5 eV



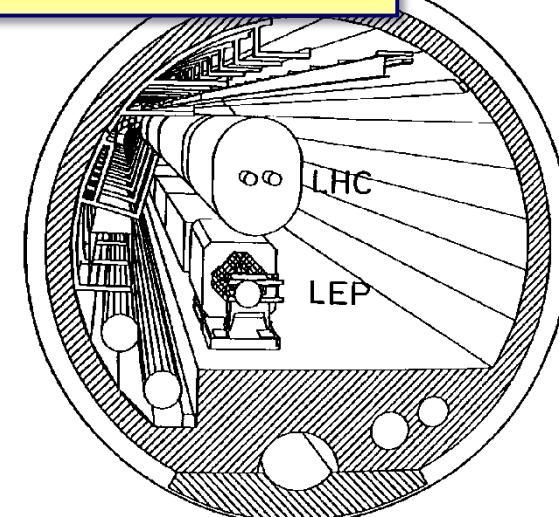
LHC - Large Hadron Collider // SPS - Super Proton Synchrotron // PS - Proton Synchrotron // AD - Antiproton Decelerator // CLEAR - CERN Linear Electron Accelerator for Research // AWAKE - Advanced WAKEfield Experiment // ISOLDE - Isotope Separator OnLine // REX/HIE - Radioactive Experiment/High Intensity and Energy ISOLDE // LEIR - Low Energy Ion Ring // LINAC - LINear ACcelerator // n-ToF - Neutrons Time Of Flight // HiRadMat - High-Radiation to Materials // CHARM - Cern High energy AcceleRator Mixed field facility // IRRAD - proton IRRADiation facility // Gif++ - Gamma Irradiation Facility // CENF - CErn Neutrino platForm

Der LHC: ~34 Jahre... und länger...

1984: Erste Ideen zum LHC (2 x 5..9 TeV) und SSC (2 x 20 TeV), LEP Tunnelbau beginnt

Idee 1984: LHC über existierenden LEP Beschleuniger

1984



1988: SSC genehmigt (Waxahachie, Texas)

1989: Erste Kollisionen bei LEP und SLC, F&E für LHC Detektoren beginnt

1993: SSC Bau gestoppt!!!

1994: LHC genehmigt (geplanter Start 2005)

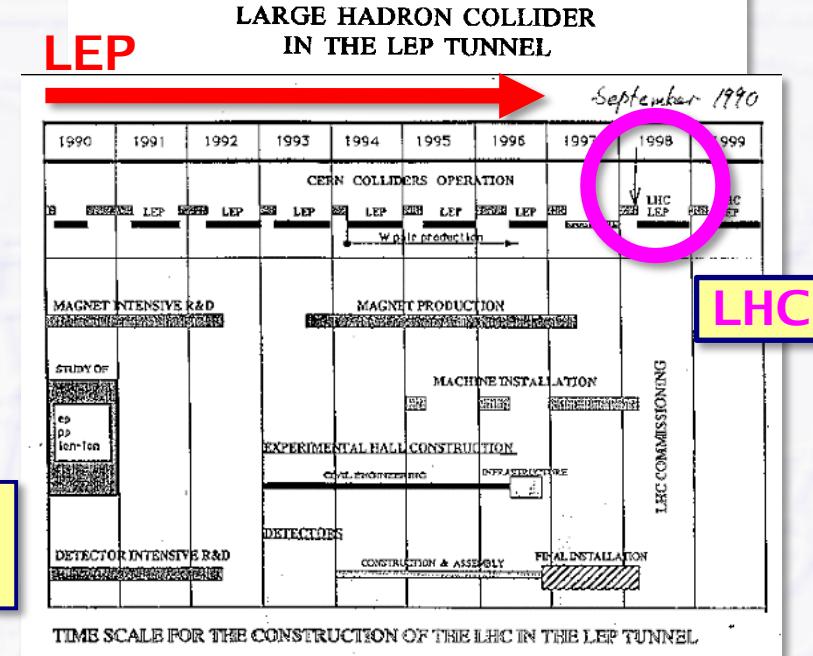
1995: Entdeckung des top Quark am Fermilab durch CDF (und D0), ATLAS und CMS genehmigt

1998: Beginn des LHC Baus

2000: Ende von LEP, kein Higgs gefunden...

Plan 1990:
LHC Start 1998...

2008: LHC Start



LHC in Zahlen

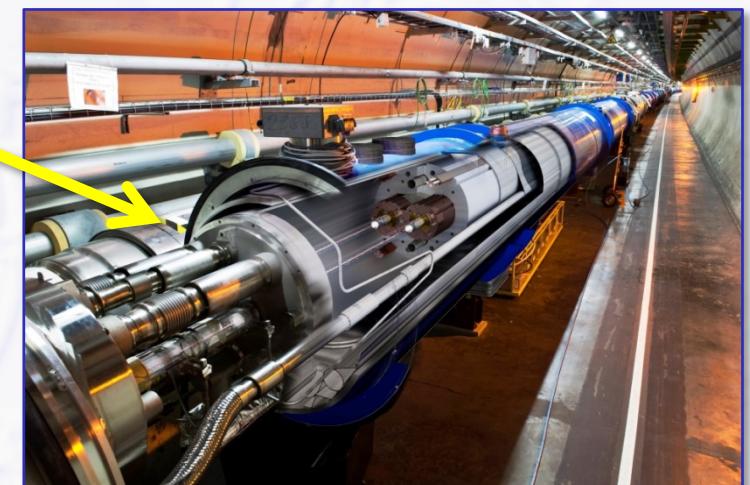
- **1232 Dipole, 8.33 Tesla @ 7 TeV bei 11850 A**
 - + 392 Quadrupole
 - + 3700 Multipol-Korrektur-Magnete + 2500 andere Korrektur-Magnete
 - 1200 Tonnen NbTi supraleitendes Kabel mit 7600 km Länge
 - gespeicherte Energie im Magnetfeld 10 GJ ($\frac{1}{2} LI^2$)
- **gesamte Kaltmasse: 30'000 Tonnen**
 - 120 Tonnen suprafluides Helium (1.9 K) zur Kühlung
 - Energie für Quench: $0.5 - 20 \text{ mJ/cm}^3 = 10^7$ Protonen bei 7 TeV
- **Anzahl der Stromverbindungen zwischen Magneten**
 - 10'000 supraleitende Verbindungen zwischen Dipolen
 - 50'000 Verbindungen für Korrektur-Magnete
- **Vakuum: 10^{-10} mbar = 3 Millionen Moleküle pro cm³**

LHC Tunnel

- Umfang: 27 km
- Durchmesser: 3.8 m



- Umfangreiche Spitzentechnologien
 - Supraleitung
 - Magnete
 - Vakuum
 - Hochfrequenz
 - Strahlkontrolle
 - Sicherheit



gespeicherte LHC Strahlergie

- 2808 Teilchenbündel, 1.1×10^{11} Protonen/Bündel @ 7 TeV
- 350 MJ gespeicherte Energie pro Protonstrahl

Airbus A320 (78 t) bei 340 km/h



ICE 3 Zug (420 t) bei 147 km/h



Queen Mary 2 (150'000 t) bei 4.2 Knoten (7.8 km/h)

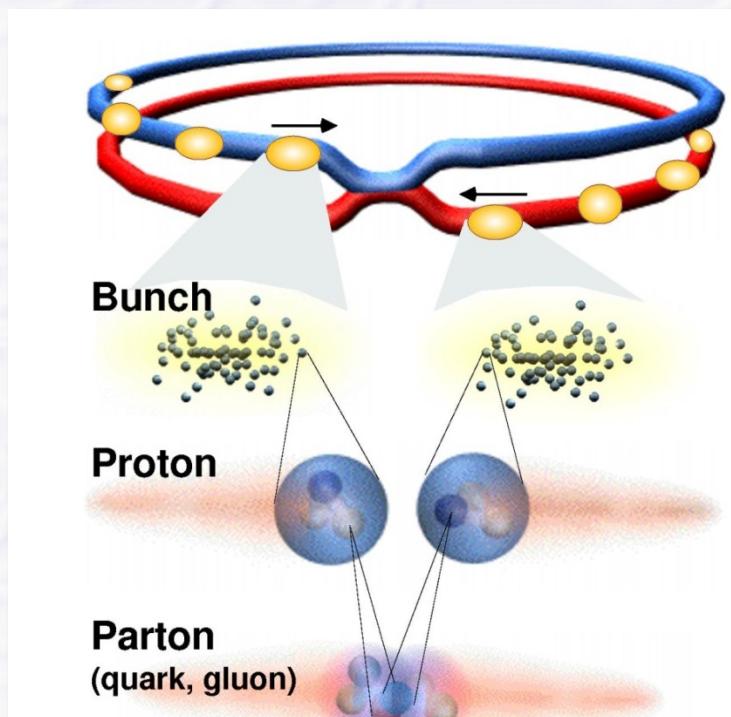


Foto: Santiago Mena Sáez.

Größtes Problem bei LHC ist die Kontrolle der gespeicherten Energie

Proton – Proton Kollisionen im LHC*

- * = Der LHC kann auch schwere Bleikerne (Schwerionen) beschleunigen und kollidieren lassen
 - Spezialexperiment für Schwerionenphysik: ALICE



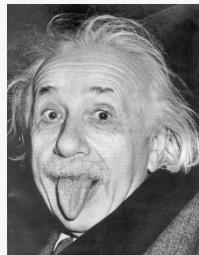
Proton – Proton (Design Parameter)

2808 x 2808 Protonenbündel (bunches)
mit 7.5 m Abstand (25 ns zeitlich)
 1.1×10^{11} Protonen/Bündel

$\sim 10^9$ pp Kollisionen/s
= Überlagerung von ~ 50 pp-Kollisionen
pro Strahlkreuzung: **pile-up**

~ 1600 geladene Teilchen im Detektor
pro Strahlkreuzung

Methoden der Teilchenphysik

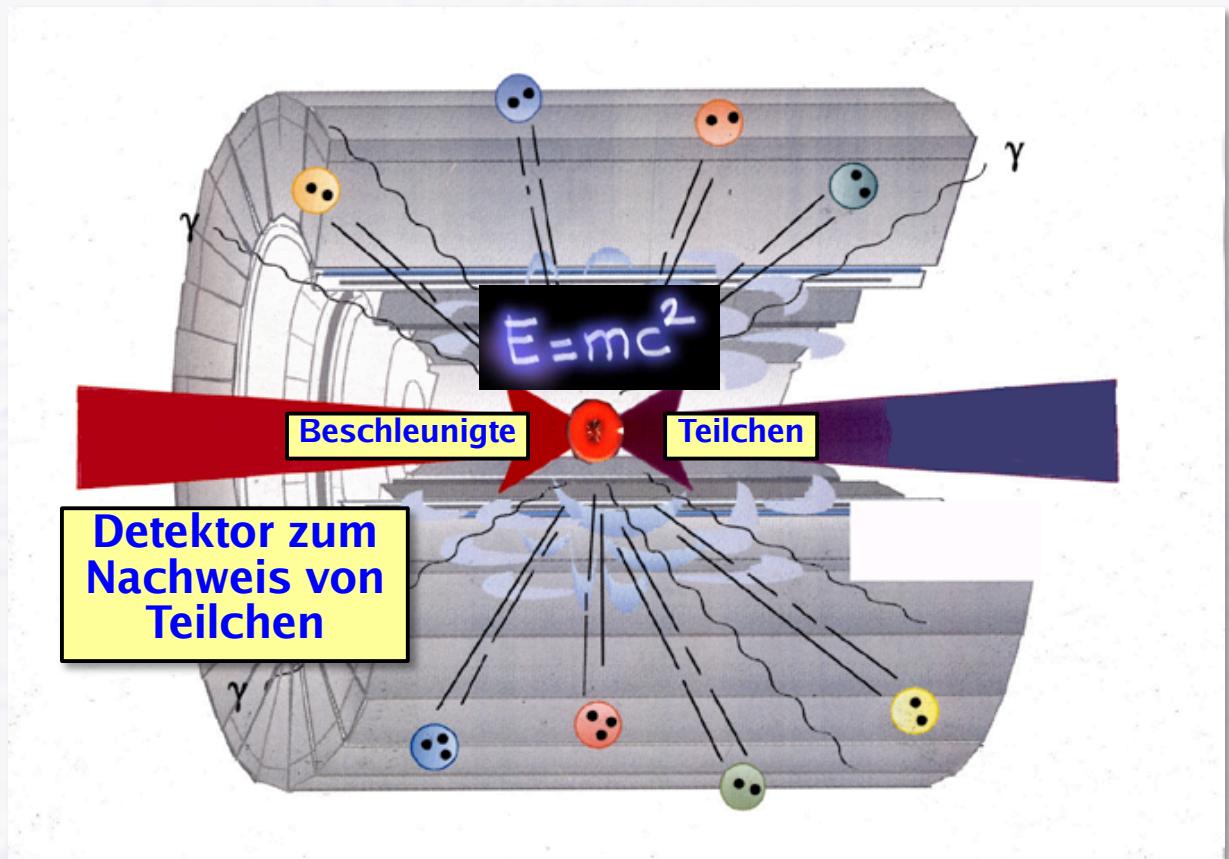


Einstein
(1905):

Materie ist
konzentrierte Energie!

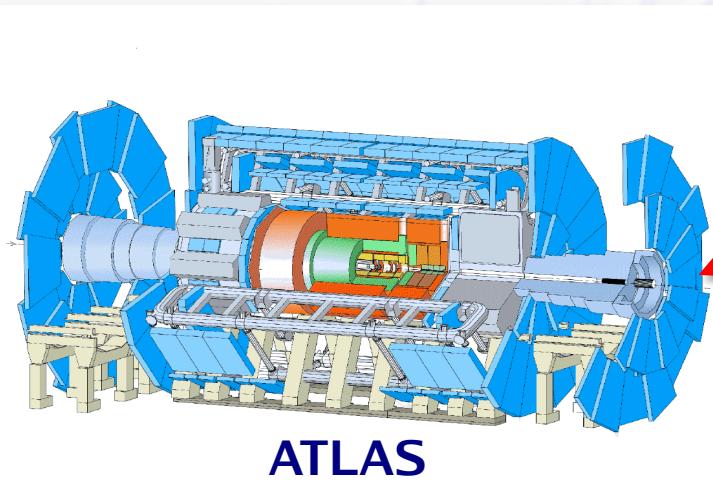
Materie lässt sich in
Energie umwandeln
und umgekehrt!

$$E = m c^2$$



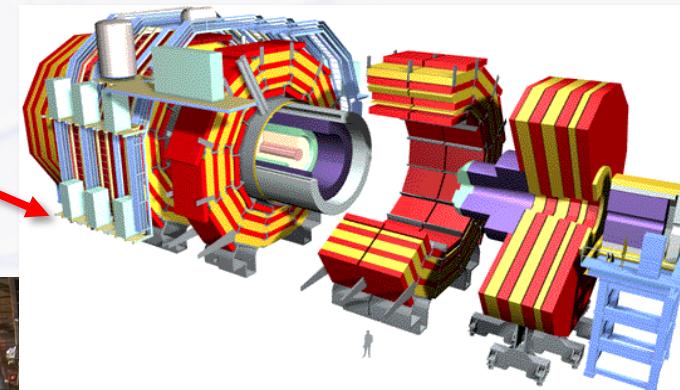
- Dies nutzen wir bei einem Teilchenbeschleuniger
 - Protonen werden beschleunigt ⇒ kinetische Energie
 - Umwandlung der kinetischen Energie bei der Kollision in Materie
 - Neue Teilchen entstehen (neue Materie) und müssen vermessen werden

LHC Detektoren

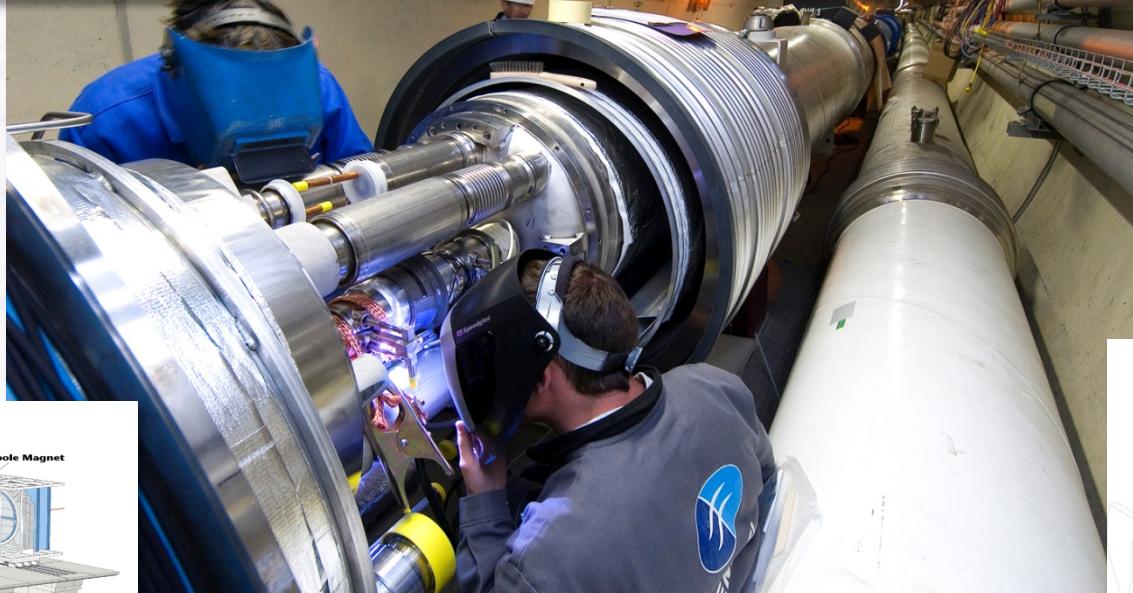


ATLAS

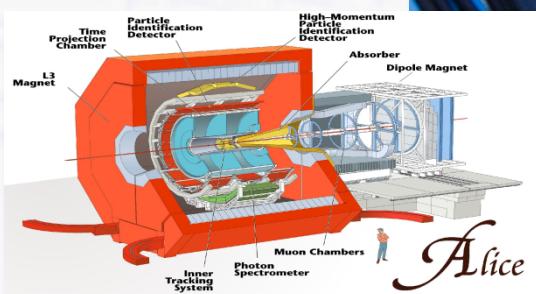
Vielzweckdetektoren
(gut für alles...)



CMS

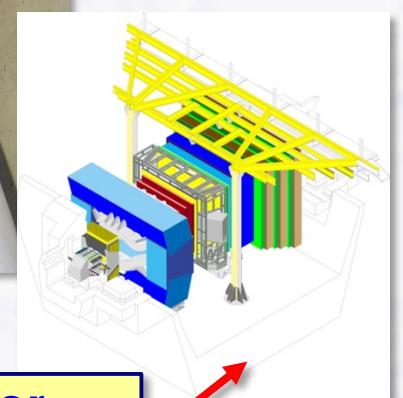


ALICE



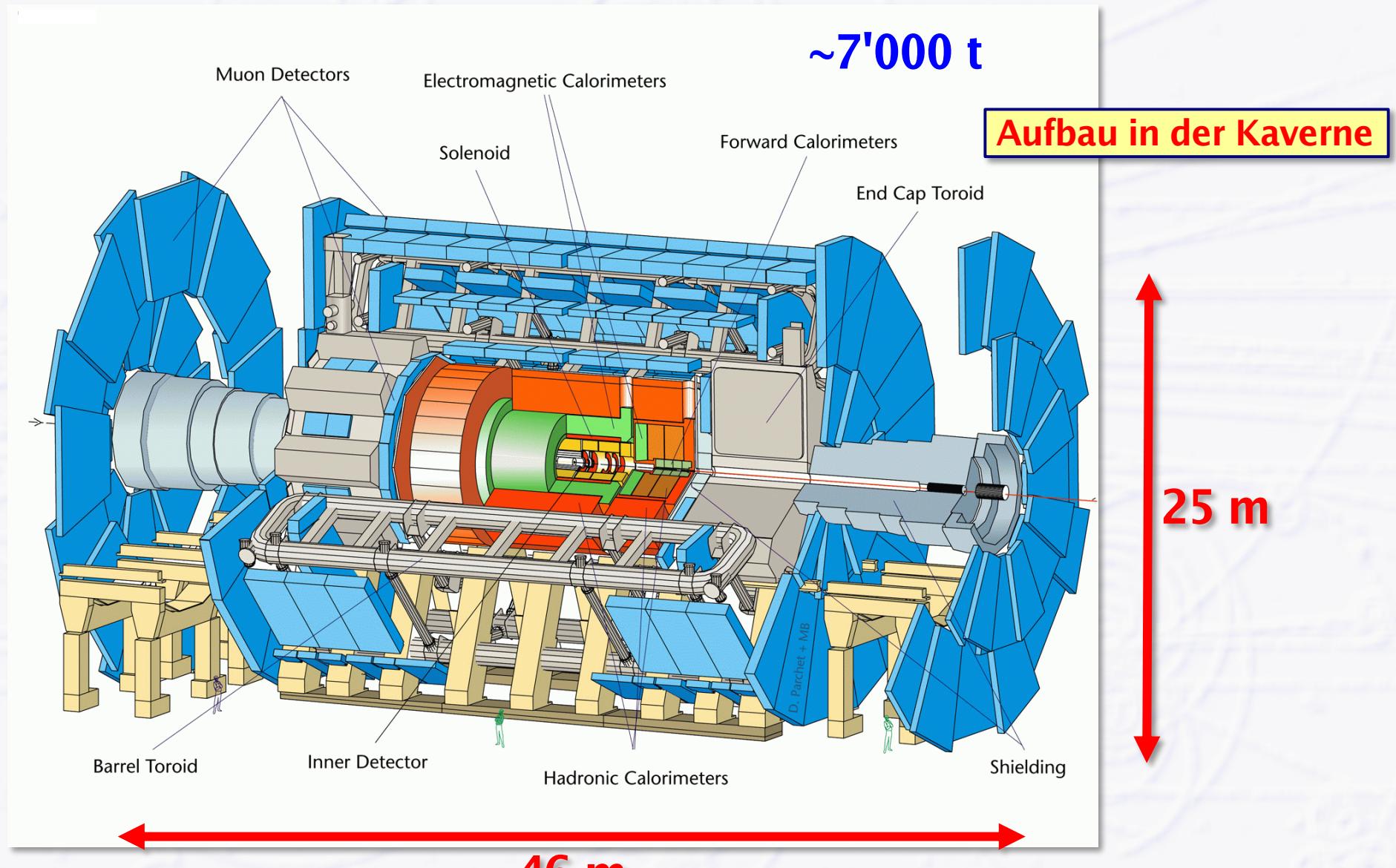
Spezialdetektor für
Schwerionenkollisionen

Spezialdetektor
für Physik mit b-Quarks

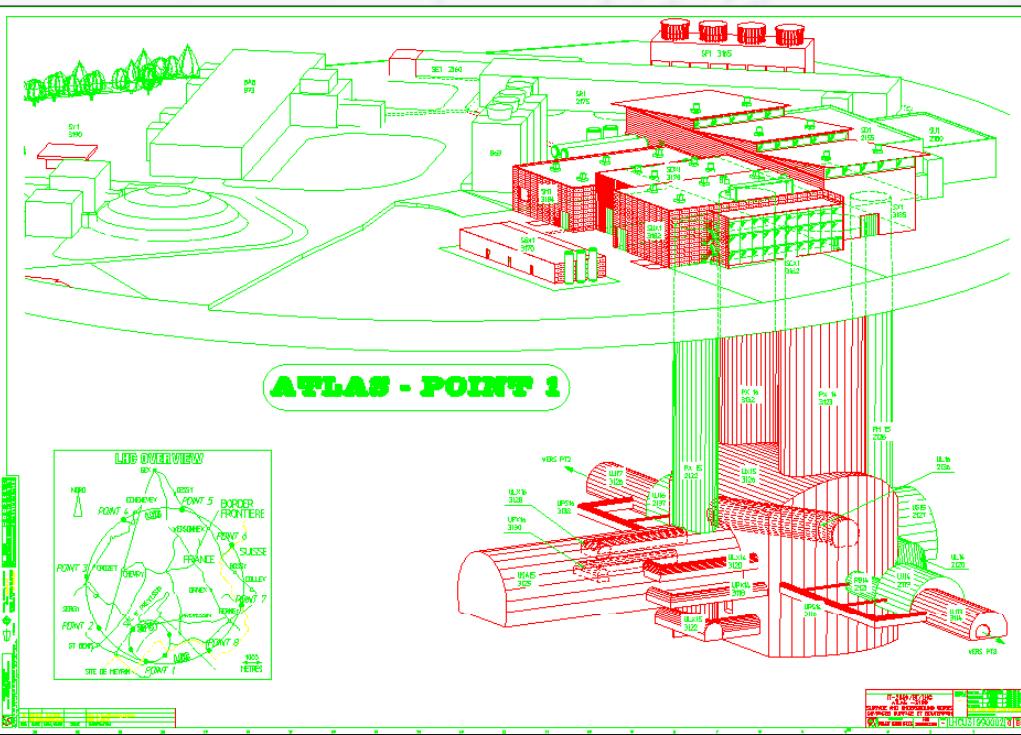


LHCb

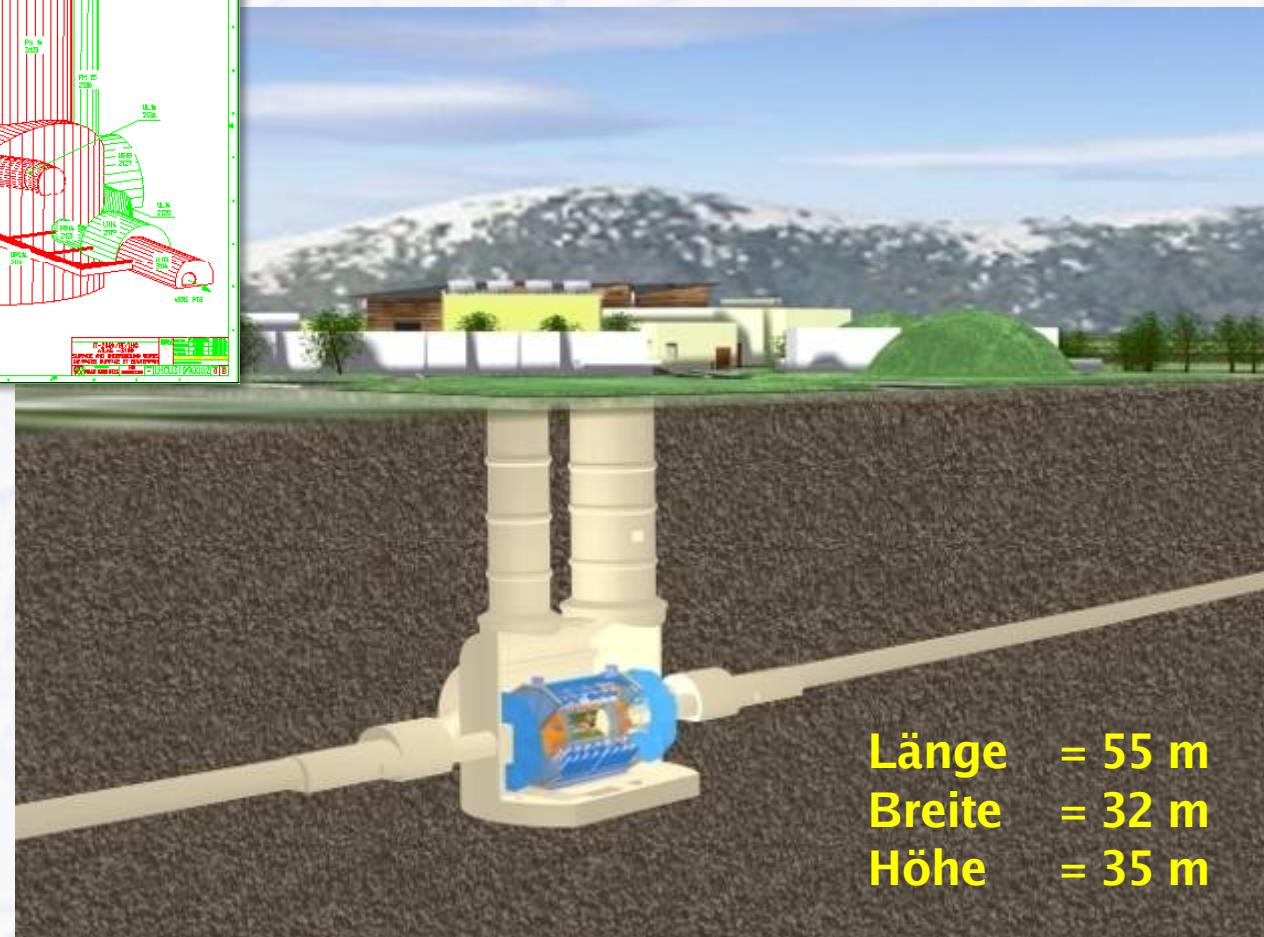
ATLAS (A Toroidal LHC ApparatuS)



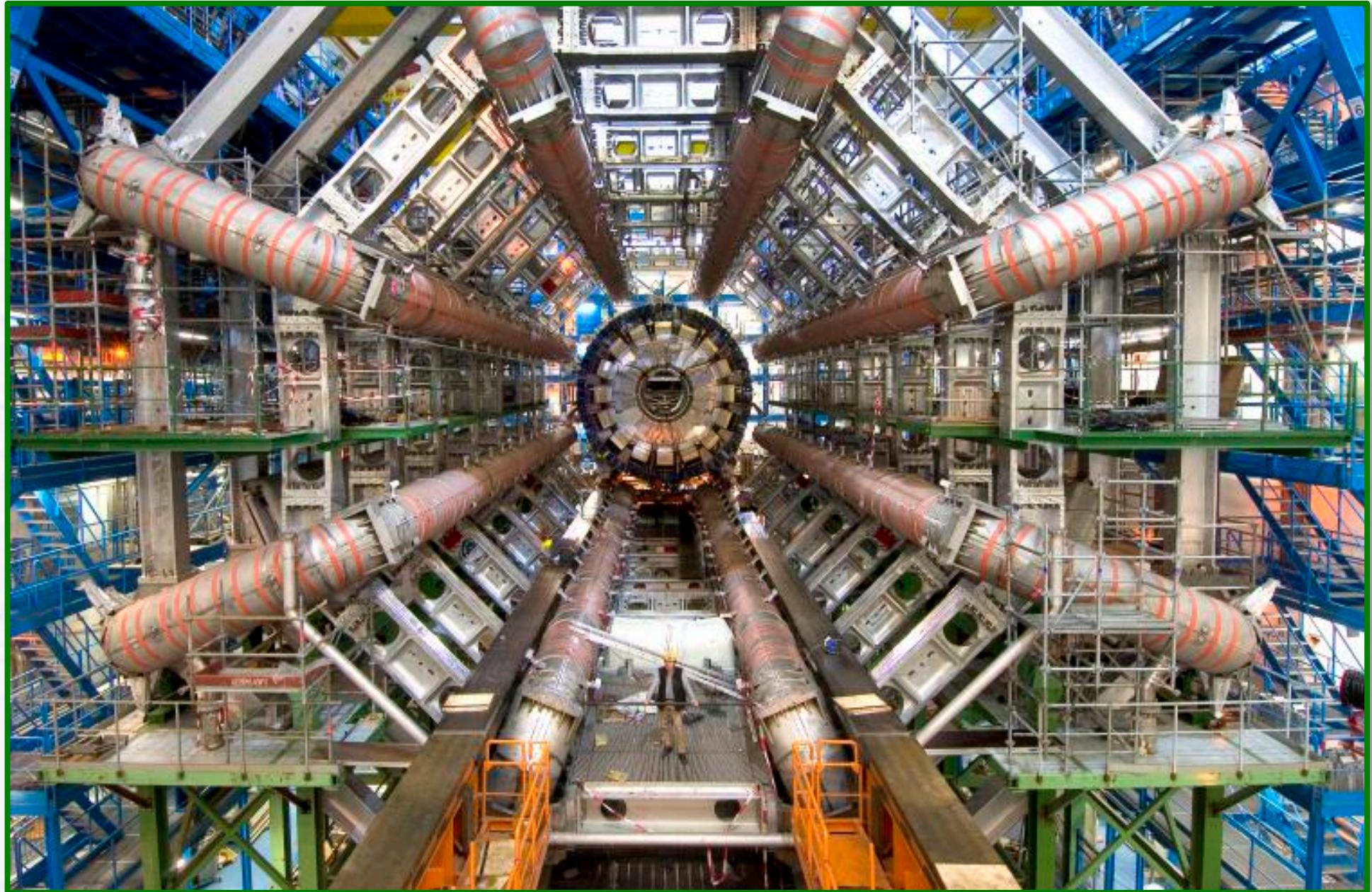
ATLAS unterirdische Kaverne



**Große Kaverne,
2 Materialschächte 18m + 12m Ø,
2 kleine Schächte für Fahrstühle + Treppen**



ATLAS Barrel Toroid fertiggestellt (Nov 2005)



Detektortechnologie und Kunst

Bühnenbild der Oper “Les Troyens” in Valencia, Oktober 2009



“Erstes Higgs” am LHC (4. April 2008)



LHC Start – 10. September 2008



Größtes Medienevent in der Geschichte der Wissenschaft

- Top News weltweit (keine weiteren Katastrophen, Politikevents etc.)
- Eurovision live satellite feed von 9:00-18:00 + Webcast
 - 2500 TV Ausstrahlungen
 - mehrere hundert Millionen Zuschauer
- 260 akkreditierte Journalisten
 - 5800 Presseartikel
- 100 Millionen Hits auf den CERN Webseiten

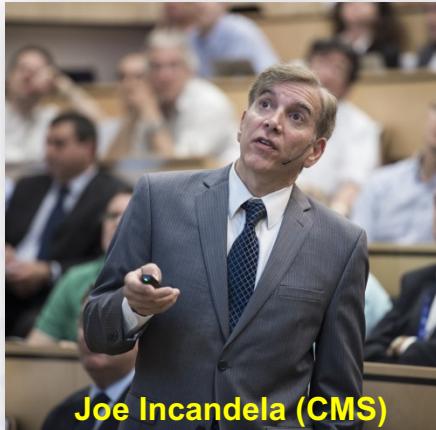
CERN Control Centre (LHC Kontrollraum)



Erste LHC Kollisionen bei hoher Energie



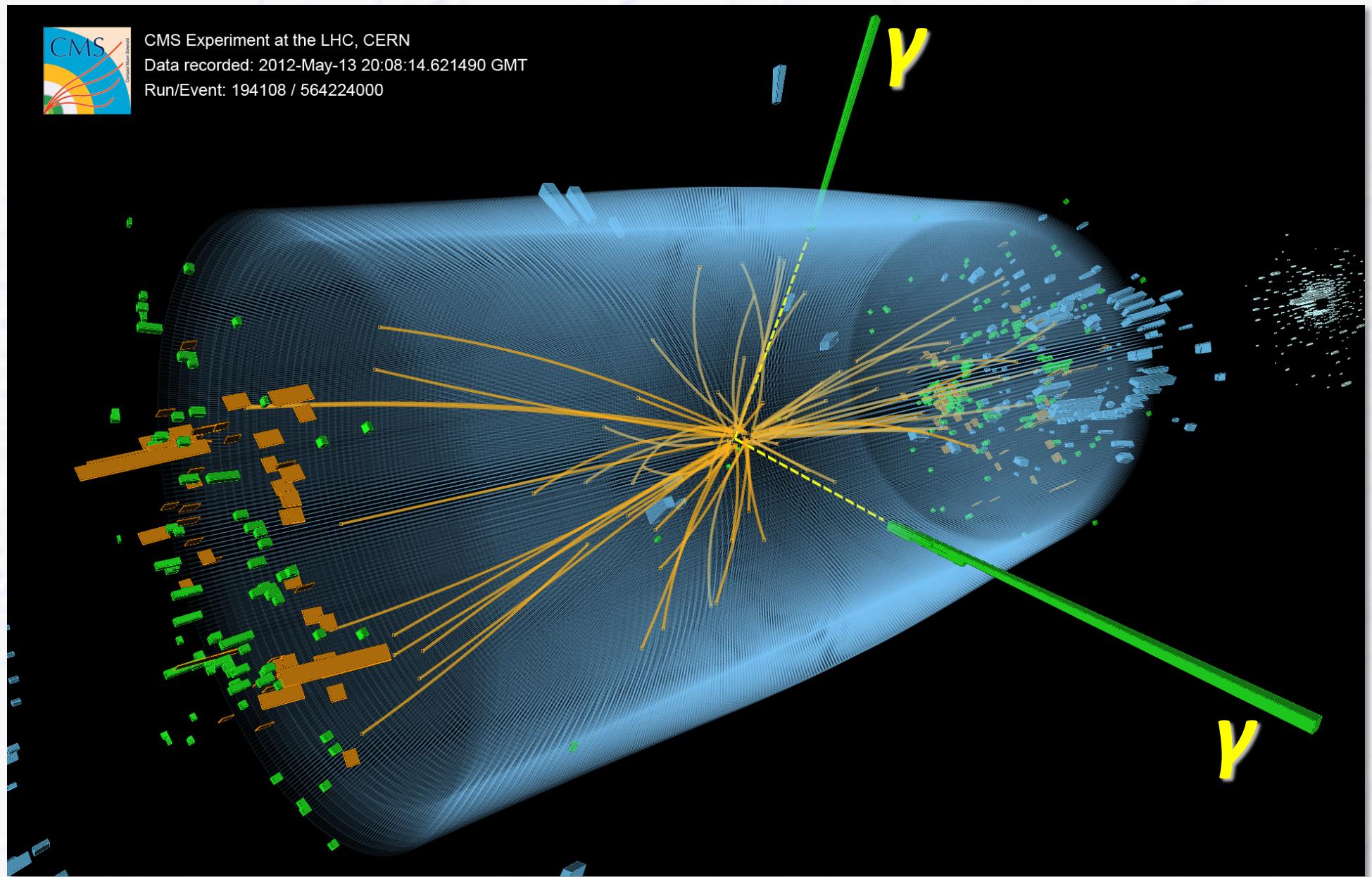
Higgs-Teilchen Entdeckung 4. Juli 2012



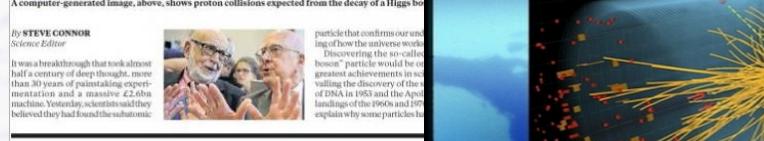
Higgs Zerfall $H \rightarrow \gamma\gamma$



CMS Experiment at the LHC, CERN
Data recorded: 2012-May-13 20:08:14.621490 GMT
Run/Event: 194108 / 564224000



Higgs in den Medien



Higgs: Stand der Erkenntnisse

- Entdeckung eines **neuen Teilchens** im Juli 2012

- Es ist **ein Boson** (Spin 0 oder 2)
- Damals nicht klar: ein Higgs?

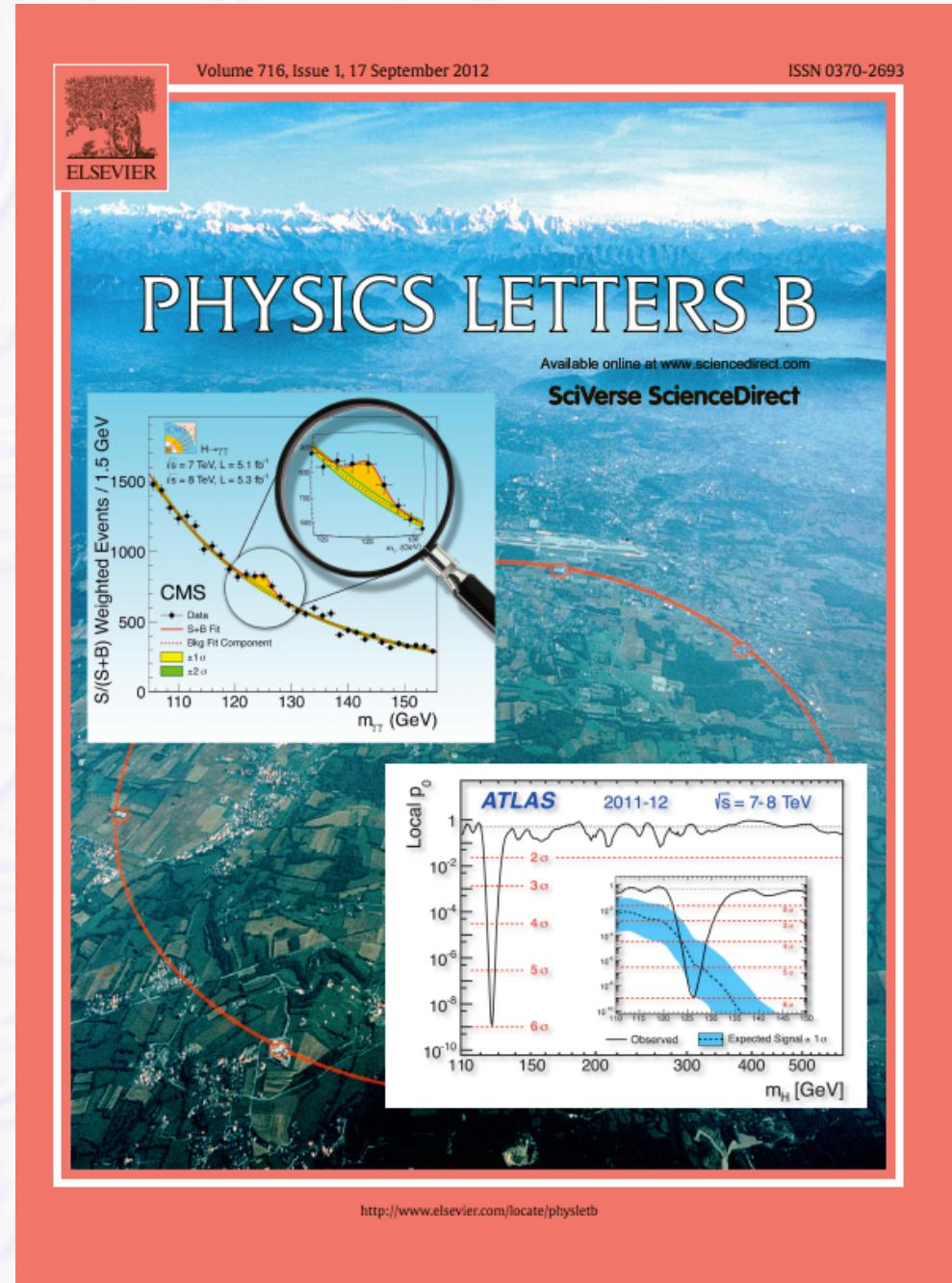
- Klar seit März 2013

- Ja, es ist **ein Higgs Boson**
 - Spin 0 (konsistent mit Higgs)

- Noch nicht klar (wird noch Jahre dauern...)

- Welche Art Higgs Boson?
 - ein **Standardmodell Higgs**?
 - dann gibt es nur ein Higgs Teilchen, **DAS "Peter Higgs" Boson**
 - ein **SUSY Higgs**?
 - dann sollte es mindestens 5 verschiedene Higgs Teilchen geben

vielleicht haben wir gerade nur das erste gefunden und es kommen noch mehr...



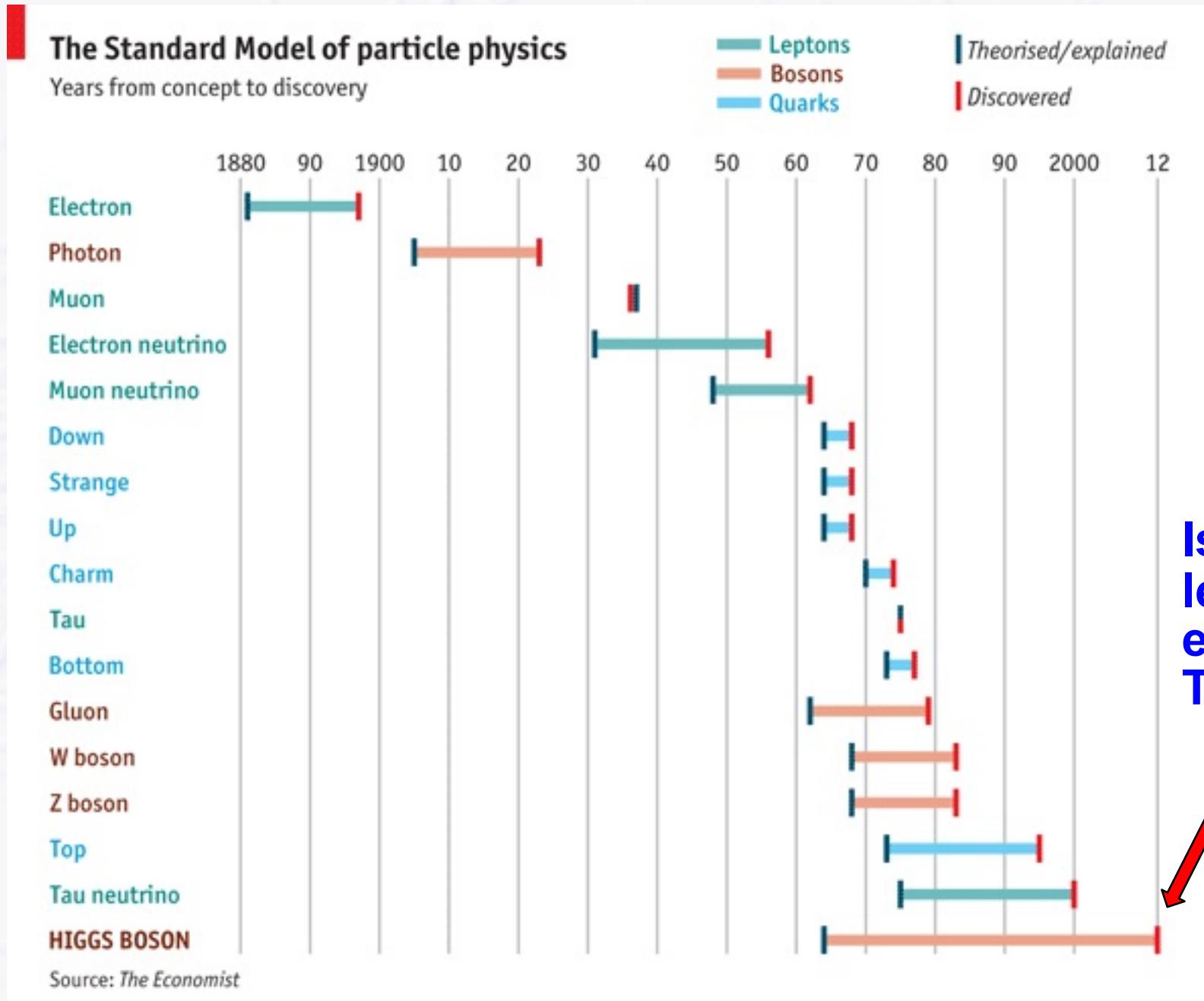
<http://www.elsevier.com/locate/physletb>

Nobelpreis für Englert und Higgs 2013

“...for the theoretical discovery of a mechanism that contributes to our understanding of the origin of mass of subatomic particles, and which recently was confirmed through **the discovery of the predicted fundamental particle, by the ATLAS and CMS experiments at CERN’s Large Hadron Collider.**”



Standardmodell Teilchenentdeckungen



Ist dies das
letzte zu
entdeckende
Teilchen?

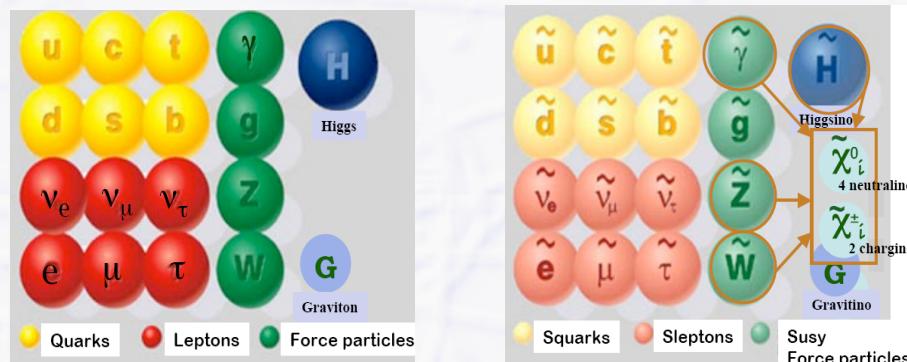
Jenseits des Standardmodells

• Im Standardmodell

- Materienteilchen = Fermionen (Spin $\frac{1}{2}$), Kraftteilchen = Bosonen (Spin 1)
- Warum diese Asymmetrie (Fermionen – Bosonen)?

• Erweiterung des Standardmodells durch neue Symmetrie: Supersymmetrie (SUSY)

- SUSY Materienteilchen = Bosonen, SUSY Kraftteilchen = Fermionen
- Verdopplung aller bisherigen Elementarteilchen

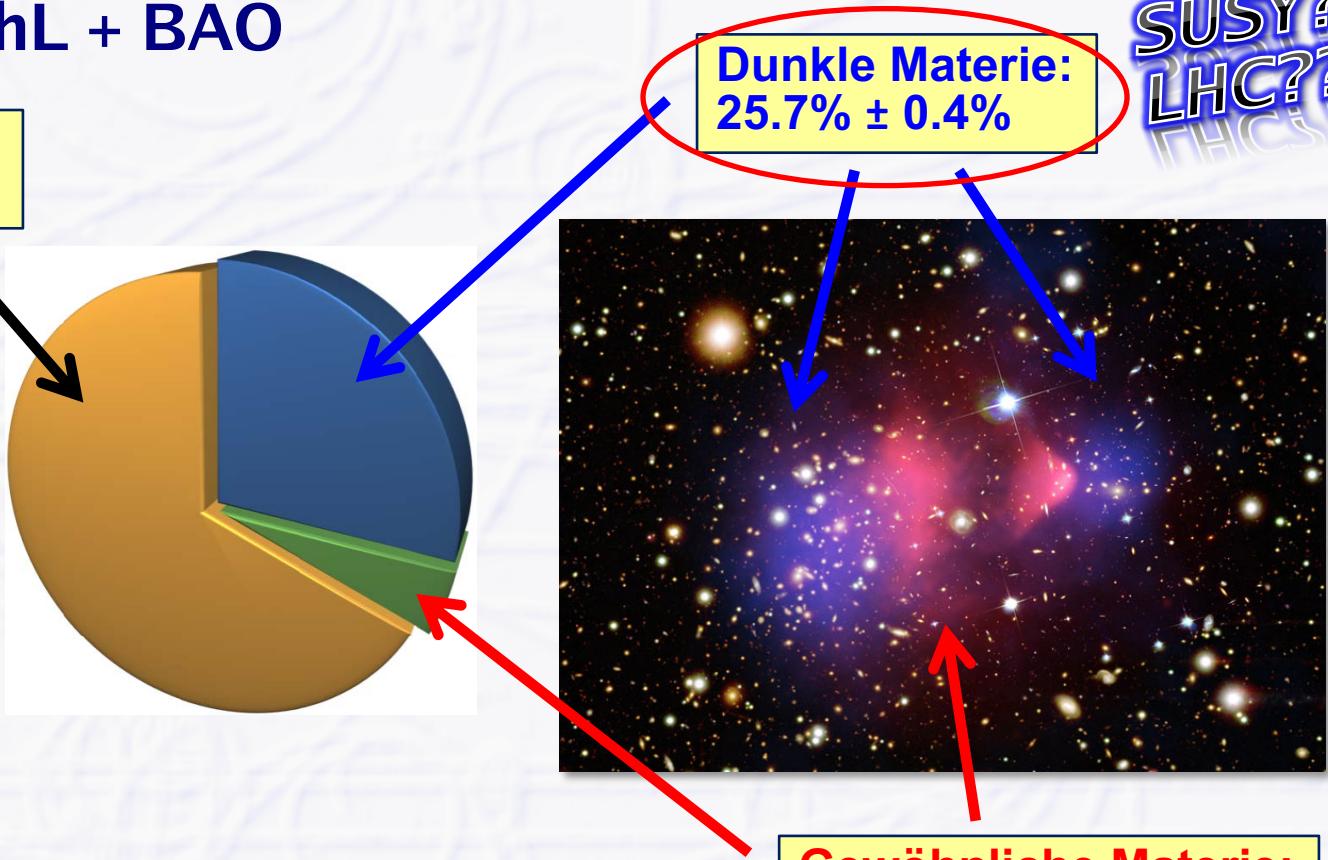
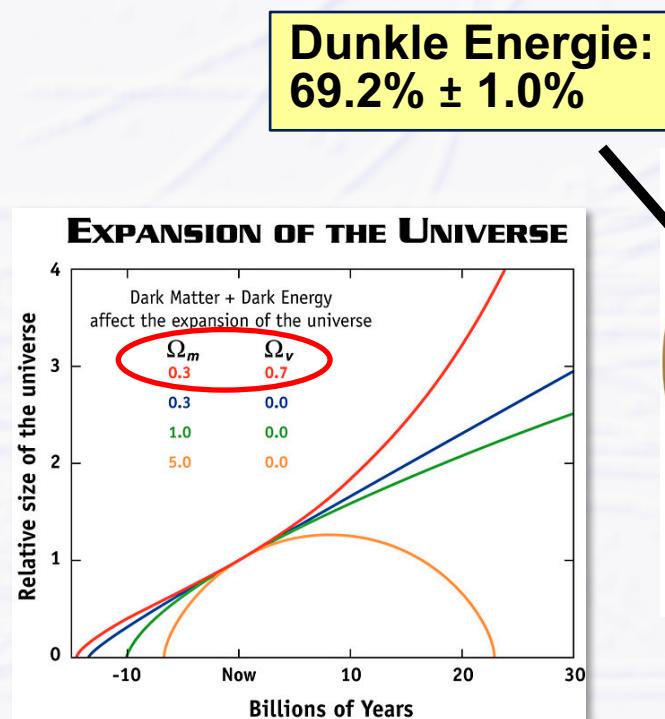


Neue Quantenzahl R-parity: $R_p = (-1)^{B+L+2s} = \begin{cases} +1 & \text{SM Teilchen} \\ -1 & \text{SUSY Teilchen} \end{cases}$

Wenn R-parity erhalten: Leichtestes SUSY Teilchen (LSP) STABIL!!!!

Bestandteile des Universums

- Parameter basierend auf Daten von Planck + WMAP
polarisation + highL + BAO



- Abgeleitete Größen

- Hubble Konstante: $67.80 \pm 0.77 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$
- Alter des Universums: $13.798 \pm 0.037 \text{ Milliarden Jahre}$

Konsequenzen für Higgs

- Minimal Supersymmetric Model (MSSM) hat 5 Higgs Teilchen

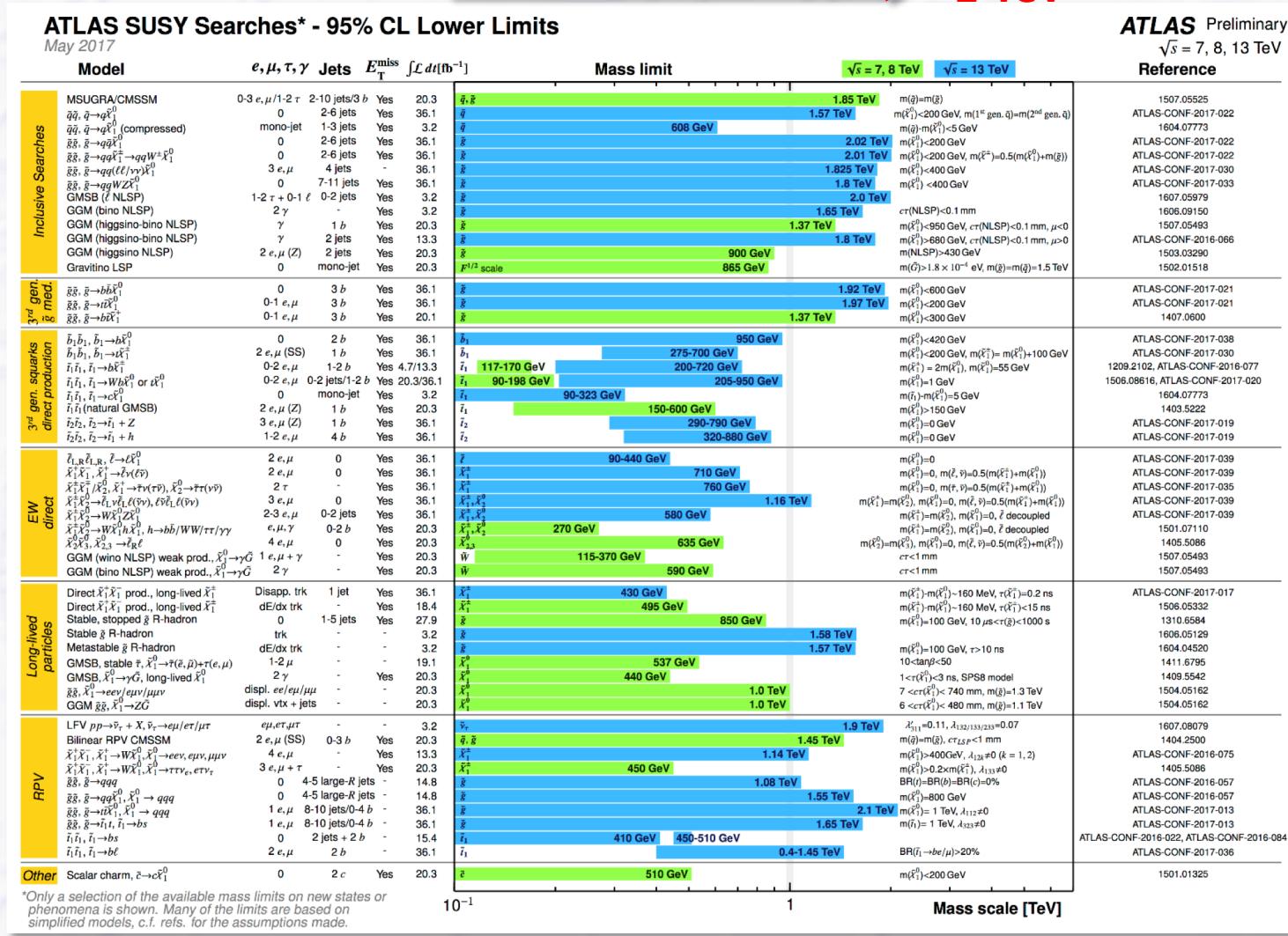
Teilchen	el. Ladung	Spin/Parität	Masse
h^0	0	0^+	leicht (< 133 GeV)
H^0	0	0^+	schwer
H^+	+1	0^+	schwer
H^-	-1	0^+	schwer
A^0	0	0^-	schwer

- Leichtestes MSSM Higgs (h^0) ist sehr ähnlich zum Standardmodell Higgs
- Ist das entdeckte Higgs das leichte h^0 im MSSM Modell?
 - wenn ja → es gibt noch mehr Higgse zu entdecken
 - Zerfälle von h^0 und H_{SM} sind sehr ähnlich, 5-10% Unterschied bei Zerfallswahrscheinlichkeiten
 - Zerfallswahrscheinlichkeiten müssen präzise gemessen werden → mehr Daten

SUSY@LHC?

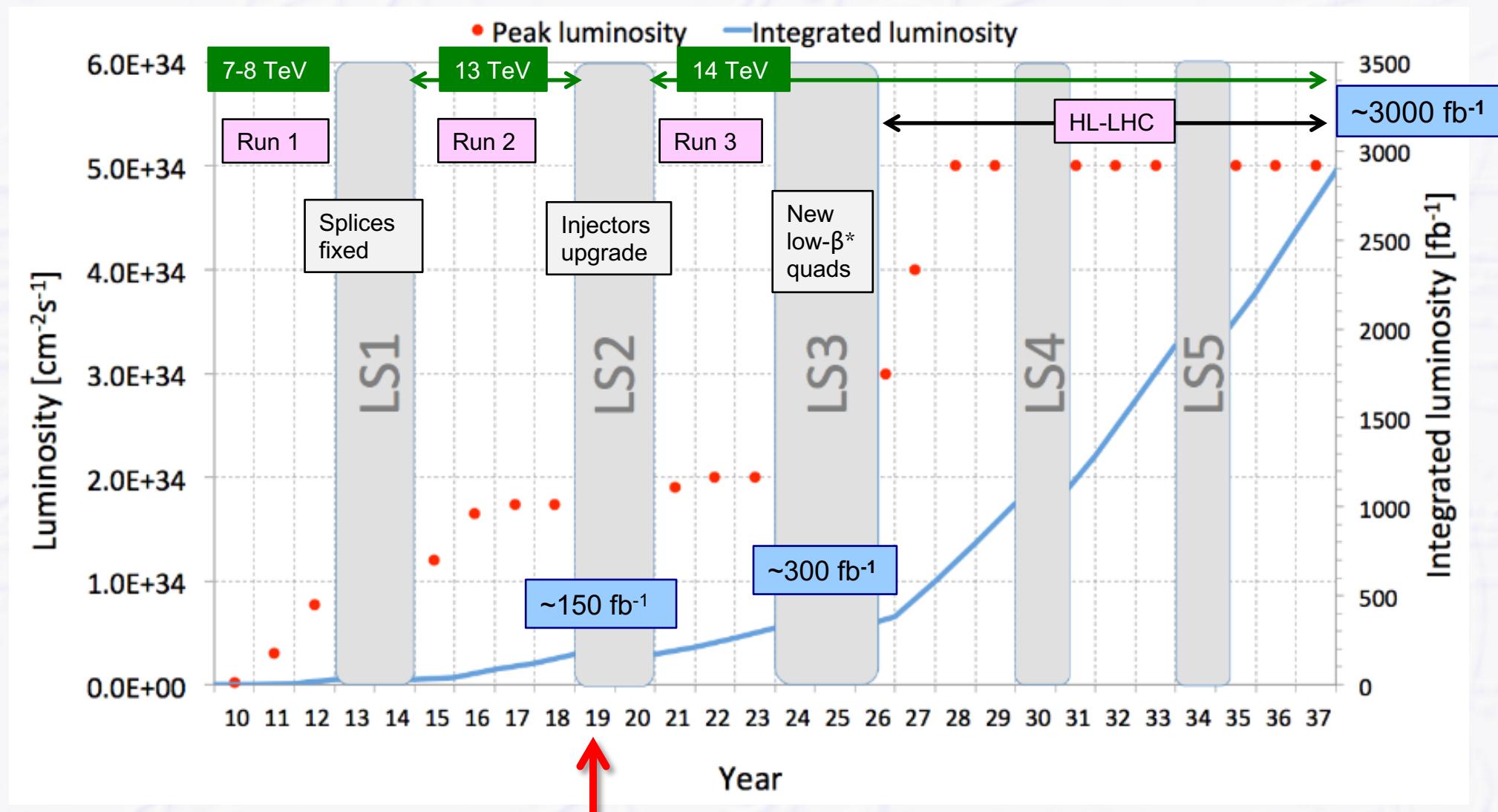
● Bisher leider keine Hinweise... nur sehr viele Ausschlußgrenzen für SUSY-Teilchen mit geringer Masse ($< \sim 1\ldots 2$ TeV)

→ > 2 TeV



LHC: Wie geht es weiter?

- LHC wird bis ~2037 laufen (ab 2026 mit höherer Luminosität)



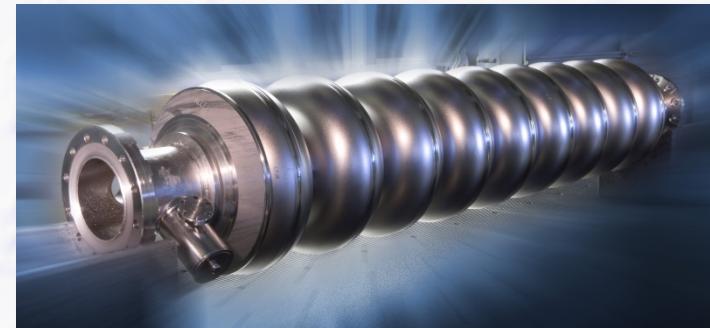
Zukunft 1a: e^+e^- @ 0.5 TeV →

ILC = International Linear Collider

• Elektron-Positron Collider

→ 0.5 – 1 TeV, 2 x 25 km Länge

- basierend auf supraleitenden Beschleunigungsstrecken (cavities)
- technologisch ausgereift
- 5% “Prototyp” derzeit im Bau (freier Elektronenlaser XFEL am DESY, Hamburg)



• “Higgs-Fabrik”

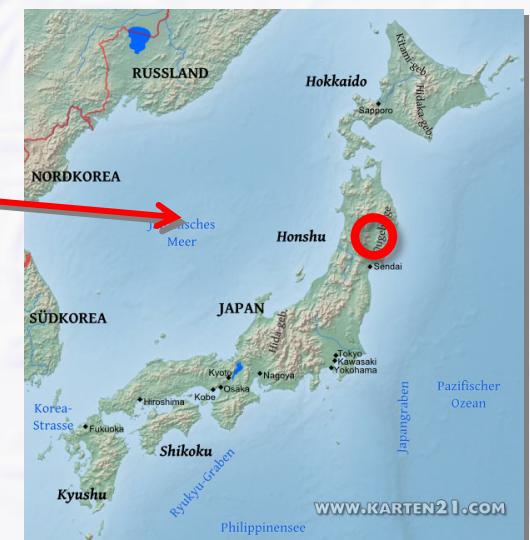
→ Präzisionsmessungen des Higgs (und Top-Quarks)

- Vorteil gegenüber Hadron Collider: nur wenig störender Untergrund anderer Reaktionen

• Japan hat Standort angeboten

→ nördlich von Sendai

- derzeit Evaluierung durch japanisches Komitee
 - Entscheidung Anfang 2020 erwartet
- danach (bei positiver Entscheidung) Partnersuche
 - weltweites Projekt: Japan (50-60%) + europäische + US-Beteiligung



Zukunft 1b: e^+e^- @ 3 TeV →

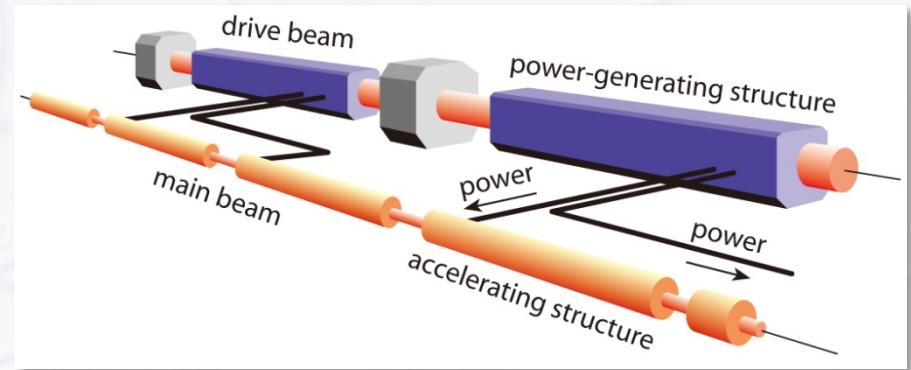
CLIC = Compact Linear Collider



• Elektron-Positron Collider

→ 3 TeV, 2 x 25 km Länge

- basierend auf normalleitenden Beschleunigungsstrecken (cavities)
- 2 Strahlen: “drive beam + main beam”
- Energieübertragung von einem niederenergetischen intensiven Strahl zu einem hochenergetischen zweiten Stahl, technologische Studie bis 2018



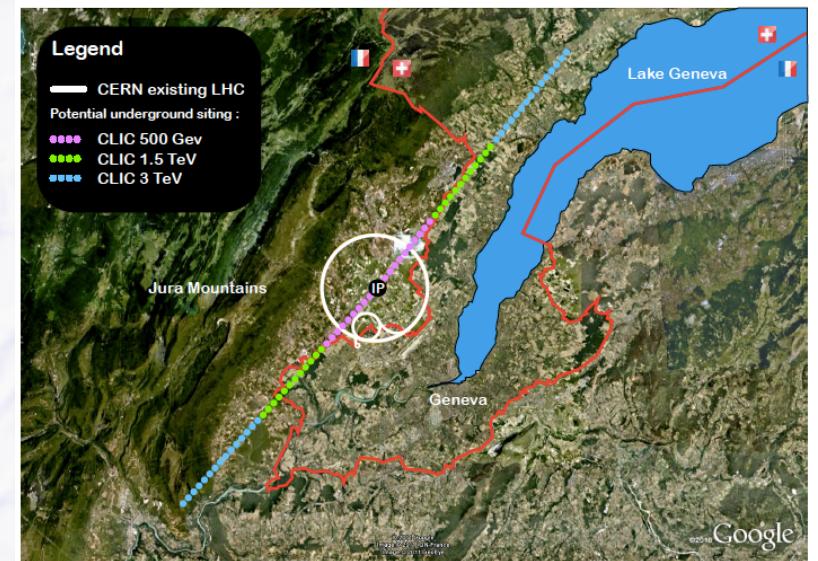
• “SUSY-Fabrik”

→ Präzisionsmessungen von SUSY Teilchen

- falls SUSY bei LHC gefunden
- komplementär zu LHC

• Möglicher Standort: CERN

- entlang des Jura
- Wechselwirkungspunkt am CERN



Zukunft 2: neuer pp Collider → FCC

FCC = Future Circular Collider

- Konzeptstudie eines 80-100 km Tunnel in der Region Genf

→ mit Möglichkeiten für e^+e^- (FCC-ee) und p-e (FCC-he)

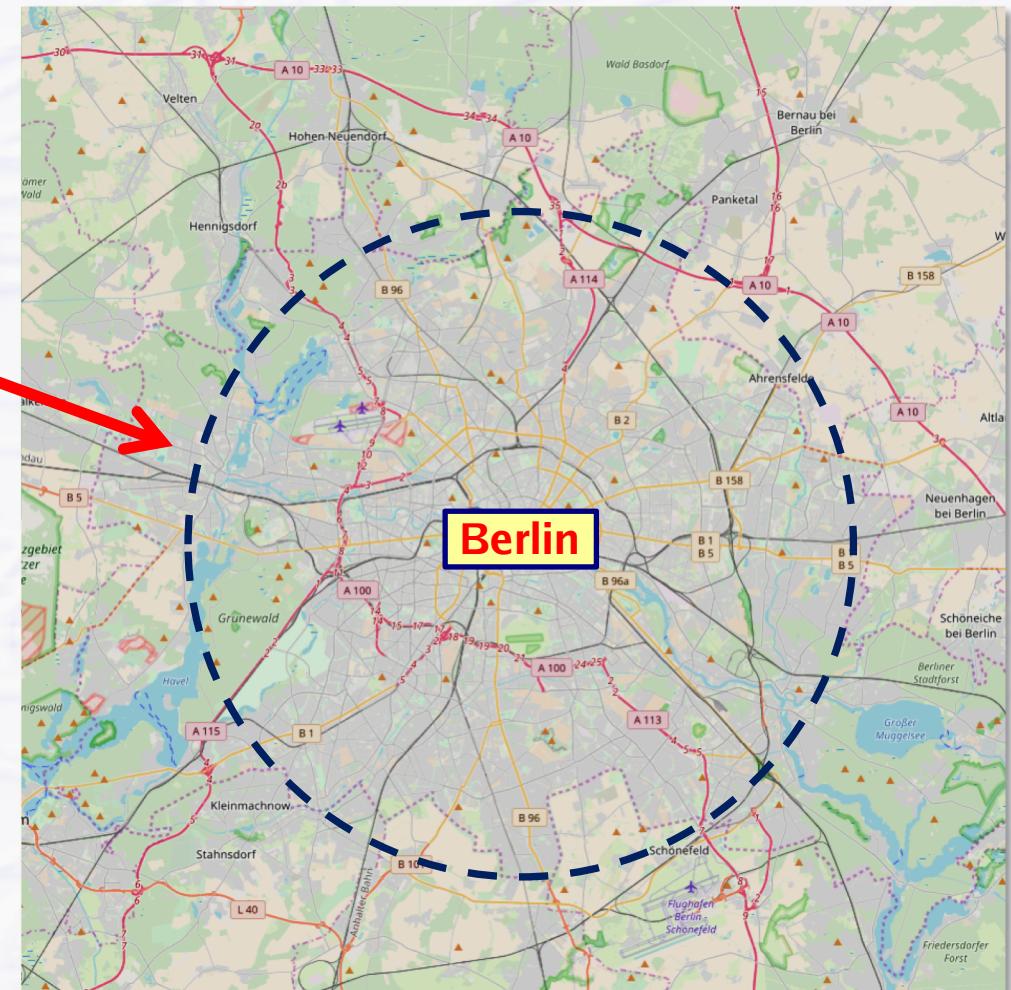
- Studie erstellt Ende 2018

16 T → 100 TeV bei 100 km
20 T → 100 TeV bei 80 km

Entwicklung neuer supraleitender Magnete nötig (Nb_3Sn statt NbTi oder Hochtemperatur-Supraleiter)

→ Physikzielsetzung

Erfordert Hinweise von LHC oder anderen Beschleunigern auf neue Phänomene in diesem Energiebereich



Aussichten

● LHC läuft bis 2037

- Run 2 mit 13 TeV abgeschlossen, Run 3 (mit 14 TeV?): 2021-23
 - ab 2026 bis ~2037: “high luminosity“ LHC
- Ziel: **3000 fb⁻¹ = 100x mehr Daten als Run 1 (Higgs-Entdeckung)**

● Nächster Update der European Strategy for Particle Physics bis Mai 2020

→ Input (neben anderem):

- Neue Phänomene bei LHC??? → Bisher keine weitere fundamentale Entdeckung
- ILC (Higgs factory) genehmigt in Japan? → Entscheidung Anfang 2020???
- CLIC (SUSY factory) Technologie Machbarkeit, Kosten (!!)
- FCC Machbarkeit, Kosten(!!!), Physikzielsetzung?

→ Output:

- Welche Richtung soll die (Hochenergie-)Teilchenphysik einschlagen?
- Was wird DAS Zukunftsprojekt des CERN nach LHC Ende ab ~2037?

Die nächsten Jahrzehnte bleiben spannend...